



Instituto Tecnológico de Toluca

**“PROCESO SOSTENIBLE PARA PAPEL RECICLADO
ADICIONADO CON CELULOSA EXTRAÍDA
DE RESIDUOS DE CAFÉ”**

PRESENTA:

ANA YATZÍN CASTAÑEDA DÍAZ

M24280369

DIRECTORA:

DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL

CODIRECTOR

DR. FREDY CUELLAR ROBLES

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, FEBRERO 2026.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, 09/Diciembre/2025
DEPI-3200-671/2025

ANA YATZIN CASTAÑEDA DÍAZ
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTE

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado **"PROCESO SOSTENIBLE PARA PAPEL RECICLADO ADICIONADO CON CELULOSA EXTRAÍDA DE RESIDUOS DE CAFÉ"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda al envío del trabajo final vía correo Institucional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Educación, integridad y ciencia"


JORGE SÁNCHEZ JAIME
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
JSJ/mccl



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52149, Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, **09/Diciembre/2025**
DEPI-3200-672/2025

DR. JORGE SÁNCHEZ JAIME
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

P R E S E N T E

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la Tesis: **"PROCESO SOSTENIBLE PARA PAPEL RECICLADO ADICIONADO CON CELULOSA EXTRAÍDA DE RESIDUOS DE CAFÉ"**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de **MAESTRA** en **CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL** presenta el **C. ANA YATZIN CASTAÑEDA DÍAZ** con número de control **M24280369** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E


DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ
BERRIEL
DIRECTORA DE TESIS

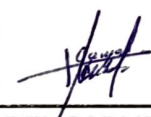

DR. FREDY CUELLAR ROBLES
CODIRECTOR DE TESIS



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TOLUCA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN


DRA. MARIA DEL CONSUELO MAÑÓN
SALAS
REVISORA DE TESIS


DRA. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE
LEÓN
REVISORA DE TESIS

ccp. Archivo
JSJ/mcc1



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52149, Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



AGRADECIMIENTOS

Primeramente, de manera muy especial agradezco a dios por guiar cada uno de mis pasos, agradezco a mi familia, por su amor incondicional, comprensión y apoyo en cada etapa de este camino. A mis padres, por ser mi mayor inspiración, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia, y por acompañarme con paciencia y aliento en los momentos más difíciles, a mi hermano, por su cariño y por recordarme siempre la importancia de seguir adelante y a mi futuro esposo que ha sido un apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.

Extiendo mi agradecimiento al señor federico y a su la Finca Cafetalera “La Ilusión” y al Ingeniero Abraham por su disposición, comunicación constante y por facilitar la materia prima y pruebas de calidad esenciales para el desarrollo de este trabajo.

De igual manera, mi más sincero reconocimiento al SECIHTI por el apoyo económico mensual, el cual fue de gran ayuda para la continuidad de esta investigación, además al Instituto Tecnológico de Toluca y al Tecnológico Nacional de México por brindarme el espacio, los recursos y las instalaciones necesarias para el desarrollo experimental del proyecto.

A mi directora de tesis, Dra. María del Consuelo Hernández Berriel, el Dr. Fredy Cuellar Robles por su tiempo, guía, paciencia y compromiso constante. Su visión científica, su orientación académica y su exigencia profesional fueron pilares fundamentales para el desarrollo y culminación de este trabajo. Agradezco también al comité evaluador, por compartir su conocimiento, por sus valiosas enseñanzas y por fomentar un ambiente de pensamiento crítico y colaboración. Cada curso, consejo y conversación contribuyó de manera significativa a mi crecimiento académico y personal.

A mis compañeros y amigos, gracias por su apoyo, por los momentos compartidos dentro y fuera del laboratorio, por las risas, los consejos y la motivación constante. Con profunda gratitud y respeto, deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a quien se vio involucrado en el proceso del proyecto.

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a quienes han sido faro y sostén en este camino de búsqueda, esfuerzo y transformación.

A mi familia, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del trabajo honesto y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Su ejemplo ha sido mi impulso constante.

A mis maestros y mentores, por sembrar en mí la pasión por el conocimiento y por desafiarme a pensar más allá de lo evidente.

A mi hermano Miguel por enseñarme a ver la vida de forma maravillosa, por no rendirse y siempre estar al pendiente.

A Carlos por apoyarme en todas mis decisiones y no dejarme sola.

A mis amigos, por su compañía generosa, por las risas compartidas en medio del cansancio y por recordarme que la ciencia también se construye con afecto.

Y a mí misma, por no rendirme, por abrazar cada reto con determinación y por seguir apostando por un mundo más sostenible, justo y consciente.

Este logro es de todos ustedes.

RESUMEN

La industria papelera y la cafetalera son dos cadenas productivas con generación de residuos y consumo de recursos naturales a nivel mundial. Una alternativa para reducir el uso de fuentes lignocelulósicas, pueden ser los residuos vegetales de la industria cafetalera, mismos que por su inadecuada disposición tienen impactos ambientales; ante este contexto, el objetivo de esta tesis fue proponer un proceso sostenible para elaborar papel reciclado, adicionado con celulosa extraída de residuos de café.

La metodología inició con el acopio de residuos de café en la Finca Cafetalera “La Ilusión” del Estado de México y, de residuos de papel en el Instituto Tecnológico de Toluca, posteriormente se realizó su caracterización mediante normas TAPPI, análisis FTIR, TGA, DSC y MEB. Para el proceso de extracción Kraft y blanqueo se hicieron pruebas a tres niveles para las variables de concentración de NaOH, temperatura y tiempos de cocción. Se elaboraron “tortillas” de papel artesanal a diferentes formulaciones con la celulosa de los residuos de café y papel reciclado, a las cuales se les realizaron pruebas de calidad. Con base a la mejor opción, se propuso un proceso, al que se le realizó evaluación ambiental, social y económica.

Los resultados evidenciaron que la borra, la cascarilla y la pulpa de café contienen 69.08, 77.33 y 61.70% de celulosa respectivamente. Las condiciones con mejores rendimientos en la extracción Kraft fueron 7%NaOH, 80°C y 1.0h para la borra; 7%NaOH, 40°C y 1.0h para la cascarilla; y 14%NaOH, 120°C y 3.0 h para la pulpa. Las mejores formulaciones fueron 30:70, 40:60 y 40:60 para la borra, cascarilla y pulpa respectivamente, presentando adecuadas propiedades físicas y mecánicas, comparables a los límites mínimos establecidos por la NMX-N-107-SCFI-2010.

El análisis de costos reveló que la incorporación de celulosa puede disminuir los costos de materia prima y tratamiento de residuos; mientras que el análisis ambiental evidenció una reducción sustancial en la huella de carbono y el consumo de recursos, en comparación con procesos convencionales de producción de papel.

ABSTRACT

The paper and coffee industries are two production chains that generate waste and consume natural resources worldwide. One alternative to reduce the use of lignocellulosic sources could be the use of coffee industry waste, which, due to its improper disposal, has environmental impacts. Given this context, the objective of this thesis was to propose a sustainable process for producing recycled paper with added cellulose extracted from coffee waste.

The methodology began with the collection of coffee waste at the "La Ilusión" Coffee Farm in the State of Mexico and paper waste at the Technological Institute of Toluca. Subsequently, the waste was characterized using TAPPI standards, FTIR, TGA, DSC, and SEM analyses. For the Kraft extraction and bleaching process, tests were conducted at three levels for the variables of NaOH concentration, temperature, and cooking time. Handmade paper "tortillas" were produced using different formulations of cellulose from coffee grounds and recycled paper, and quality tests were performed. Based on the best option, a process was proposed and subjected to environmental, social, and economic evaluation.

The results showed that coffee grounds, husks, and pulp contain 69.08%, 77.33%, and 61.70% cellulose, respectively. The conditions with the best Kraft extraction yields were 7% NaOH, 80°C, and 1.0 h for grounds; 7% NaOH, 40°C, and 1.0 h for husks; and 14% NaOH, 120°C, and 3.0 h for pulp. The best formulations were 30:70, 40:60, and 40:60 for the lint, husk, and pulp, respectively, exhibiting adequate physical and mechanical properties comparable to the minimum limits established by NMX-N-107-SCFI-2010.

The cost analysis revealed that incorporating cellulose can reduce raw material and waste treatment costs; while the environmental analysis demonstrated a substantial reduction in the carbon footprint and resource consumption compared to conventional paper production processes.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIAS	v
RESUMEN	vi
RELACION DE TABLAS	xi
RELACION DE FIGURAS.....	xiii
INTRODUCCION	1
1. FUNDAMENTOS	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 PRODUCCION Y CARACTERISTICAS DE PAPEL.....	6
1.2.1 Papel y celulosa	7
1.2.2 Producción y composición del papel	10
1.2.3 Proceso de extracción Kraft	13
1.2.4 Normatividad e índices de calidad en la industria papelera.....	15
1.3 PRODUCCION Y RESIDUOS DE CAFÉ	16
1.3.1 Cultivo y cosecha de café.....	16
1.3.2 Producción de café.....	17
1.3.3 Residuos de café.....	20
1.3.3 Caracterización de residuos de café	22
1.4 RECICLAJE.....	22
1.4.1 PROCESO DE RECICLAJE DE PAPEL.....	22
1.5 SOSTENIBILIDAD.....	26
2. MÉTODO	29
2.1 ACOPIO DE RESIDUOS.....	30
2.1.1 Acopio de residuos de café.....	30
2.1.2 Acopio de papel usado.....	30

2.2	CARACTERIZACION DE RESIDUOS.....	30
2.3	PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	31
2.3.1	Preparación de muestras de borra de café.....	32
2.3.2	Preparación de muestras de pulpa de café	32
2.4	OBTENCIÓN DE CELULOSA	33
2.4.1	Diseño de experimentos para extracción Kraft.....	33
2.4.2	Digestión Kraft para residuos de café.....	34
2.4.3	Celulosa de papel reciclado	34
2.5	FORMULACIÓN.....	35
2.6	ESTÁNDARES DE CALIDAD.....	35
2.7	EVALUACIÓN SOSTENIBLE	39
2.8	TRATAMIENTO DE RESIDUOS.....	39
3.	RESULTADOS	41
3.1	ACOPIO DE RESIDUOS.....	41
3.1.1	Acopio de residuos de café	41
3.1.2	Acopio de papel usado	43
3.2	CARACTERIZACION DE RESIDUOS.....	43
3.2.1	Caracterización de lignocelulósicos.....	44
3.2.2	Análisis por FTIR.....	46
3.2.3	Análisis termogravimétrico (TGA).....	49
3.2.4	Análisis de entalpia de descomposición (DSC)	52
3.2.5	Análisis por microscopio electrónico de barrido	55
3.3	PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	59
3.3.1	Preparación de muestras de borra de Café.....	59
3.3.2	Preparación de muestras de pulpa de café	61
3.4	OBTENCIÓN DE CELULOSA	62

3.4.1	Diseño de experimentos para extracción kraft	63
3.4.2	Digestión Kraft para residuos de café.....	69
3.4.3	Celulosa de papel reciclado	70
3.5	FORMULACIÓN	71
3.6	ESTÁNDARES DE CALIDAD.....	72
3.7	EVALUACIÓN SOSTENIBLE	74
3.7.1	Evaluación técnica.....	75
3.7.2	Evaluación socioeconómica	79
3.7.3	Análisis de impacto ambiental.....	94
3.8	TRATAMIENTO DE RESIDUOS.....	98
CONCLUSIONES		99
RECOMENDACIONES.....		101
REFERENCIAS		102
ANEXOS.....		116
ANEXO A Proceso de análisis		116
ANEXO B Lavados de borra		125
ANEXO C Pruebas de Blanqueo		127
ANEXO D Formación de tortillas.....		128

RELACION DE TABLAS

Tabla 1.1 Artículos fuentes no maderables para extracción de celulosa	2
Tabla 1.2 Referencias de condiciones de extracción Kraft en residuos agrícolas	5
Tabla 1.3 Clasificación de tipos de papel y sus usos	8
Tabla 1.4 Empresas líderes en producción de papel a nivel mundial 2023	11
Tabla 1.5 Cantidad y tipos de aditivos para papel	15
Tabla 1.6 Normatividad mexicana para papel	16
Tabla 1.7 Producción de café por grupos y años de cosecha (en miles de sacos) ..	18
Tabla 1.8 Calidades de café y principales productores OIC	18
Tabla 1.9 Países dominantes en producción de café año 2013/14	19
Tabla 1.10 Producción de café en México	19
Tabla 1.11 Composición química residuos de café	21
Tabla 1.12 Impactos ambientales de la producción de café	21
Tabla 1.13 Contenido de material recuperado	25
Tabla 1.14 Compostaje de pulpa de café	27
Tabla 1.15 Empresas uso de fuentes no maderables	28
Tabla 2.1 Caracterización fisicoquímica y normas TAPPI de residuos de café	31
Tabla 2.2 Diseño de experimentos para residuos de café	34
Tabla 2.3 Formulación de papel reciclado	35
Tabla 2.4 Parámetros de calidad del papel	36
Tabla 3.1 Resultados Caracterización 1 de materias primas	44
Tabla 3.2 Caracterización de experimentos de borra	63
Tabla 3.3 ANOVA de borra de café	64
Tabla 3.4 Caracterización de experimentos de cascarilla	65
Tabla 3.5 ANOVA de cascarilla de café	66
Tabla 3.6 Caracterización de experimentos de pulpa	68
Tabla 3.7 ANOVA de pulpa de café	68
Tabla 3.8 Porcentajes de formación de hojas de borra de café	71
Tabla 3.9 Porcentajes de formación de hojas de cascarilla de café	71
Tabla 3.10 Porcentajes de formación de hojas de pulpa de café	72
Tabla 3.11 Resultados pruebas de calidad de borra	72
Tabla 3.12 Resultados pruebas de calidad de cascarilla	73

Tabla 3.13 Resultados pruebas de calidad de pulpa.....	74
Tabla 3.14 Equipos para producción de papel con celulosa de borra de café	76
Tabla 3.15 Equipos para producción de papel con celulosa de cascarilla de café...	77
Tabla 3.16 Costos de materias primas	81
Tabla 3.17 Equipos de laboratorio.....	81
Tabla 3.18 Materiales de laboratorio	82
Tabla 3.19 Gasto energético de equipo de laboratorio.....	84
Tabla 3.20 Reactivos para pruebas de laboratorio.....	85
Tabla 3.21 Costos de mano de Obra	85
Tabla 3.22 Consumo energético proceso de borra de café.....	86
Tabla 3.23 Insumos de producción de papel con borra de café	86
Tabla 3.24 Costos de producción de papel con borra de café	87
Tabla 3.25 Ventas de papel del proceso de borra	88
Tabla 3.26 Consumo energético proceso de cascarilla de café	90
Tabla 3.27 Insumos de producción de papel con cascarilla de café	90
Tabla 3.28 Costos de producción de papel con cascarilla de café.....	91
Tabla 3.29 Insumos de producción de papel con pulpa de café	92
Tabla 3.30 Costos de producción de papel con pulpa de café	93
Tabla 3.31 Inventario para análisis de ciclo de vida	95

RELACION DE FIGURAS

Figura 1.1 Proceso industrial de producción de papel	11
Figura 1.2 Estructura del fruto del café	17
Figura 1.3 Producción mundial de café por especie	18
Figura 1.4 Proceso de producción de papel reciclado	23
Figura 2.1 Diagrama de la metodología del proceso	29
Figura 3.1 Cafeteras domesticas	41
Figura 3.2 Ubicación de finca la Ilusión	42
Figura 3.3 Semilleros de café	42
Figura 3.4 Plantas de Café	42
Figura 3.5 Residuos pulpa empaquetada	42
Figura 3.6 Recolección de muestras de papel usado	43
Figura 3.7 Espectro IR de borra de café	47
Figura 3.8 Espectro IR de cascarilla de café	48
Figura 3.9 Espectro IR de pulpa de café.....	48
Figura 3.10 Equipo TGA550 marca Discovery.....	49
Figura 3.11 TGA de borra de café.....	50
Figura 3.12 TGA de cascarilla de café.....	50
Figura 3.13 TGA de pulpa de café	51
Figura 3.14 Equipo DSC250	52
Figura 3.15 Termograma de borra de café.....	53
Figura 3.16 Termograma de cascarilla de café	53
Figura 3.17 Termograma de pulpa de café	54
Figura 3.18 Porta muestras con muestras	55
Figura 3.19 Microscopio electrónico de barrido	55
Figura 3.20 Baño de átomos de oro.....	55
Figura 3.21 SEM x500 borra de café	56
Figura 3.22 SEM x1000 borra de café	56
Figura 3.23 SEM x1500 borra de café	56
Figura 3.24 SEM x2000 borra de café	56
Figura 3.25 SEM x500 cascarilla de café.....	57
Figura 3.26 SEM x1000 cascarilla de café.....	57

Figura 3.27 SEM x1500 cascarilla de café.....	57
Figura 3.28 SEM x2000 cascarilla de café.....	57
Figura 3.29 SEM x500 de pulpa de café.....	58
Figura 3.30 SEM x1000 de pulpa de café.....	58
Figura 3.31 SEM x1500 de pulpa de café.....	58
Figura 3.32 SEM x2000 de pulpa de café.....	58
Figura 3.33 Cascarilla de café	59
Figura 3.34 Espectrofotómetro del laboratorio LIIA.....	60
Figura 3.35 lavados de muestra compuesta relación 1:1.....	60
Figura 3.36 lavados de muestra compuesta relación 1:2.....	60
Figura 3.37 Lavados de muestra simple relación 1:1.....	61
Figura 3.38 Lavados de muestra simple relación 1:2.....	61
Figura 3.39 Molino Marca IKA ® MF basic.....	61
Figura 3.40 Lavados para eliminación de azúcares.....	62
Figura 3.41 Muestras blanqueadas de borra de café.....	62
Figura 3.42 Pesado de materia prima.....	70
Figura 3.43 Equipo utilizado para extracción Kraft.....	70
Figura 3.44 Diagrama de bloques producción de papel con borra.....	75
Figura 3.45 Diagrama de bloques producción de papel con cascarilla	77
Figura 3.46 Diagrama de bloques producción de papel con pulpa	78
Figura 3.47 Ubicación de lugar de trabajo	79
Figura 3.48 Área de oficinas de nave industrial	80
Figura 3.49 Área de operación.....	80
Figura 3.50 Vaciado de datos al SIMAPRO	95
Figura 3.51 Gráfico de caracterización emitido por SIMAPRO	96
Figura 3.52 Gráfico de evaluación del daño emitido por SIMAPRO	97
Figura 3.53 Gráfico de Normalización emitido por SIMAPRO	97

INTRODUCCION

Para la fabricación de una tonelada de papel se necesitan aproximadamente de 17 árboles adultos, 30,000 L de agua y 1,500 L de aceite y aproximadamente 4,000 kv/h de energía, esta industria también cuenta con una huella de carbono por sus acciones directas, pues para fabricar una tonelada de papel se emanan aproximadamente 30 kg de sustancia contaminantes a la atmosfera. En México se desperdician 2.5 millones de toneladas de papel y cartón, si se reciclara al menos la mitad, se evitaría la tala de 17,500 árboles. Cada tonelada de papel reciclado ahorra más de 2.3 m³ de relleno sanitario, además, el proceso de reciclaje de papel puede ser más energéticamente eficiente y generar menos emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la fabricación tradicional de papel (Berrios, 2016).

Por otro lado, la industria cafetalera genera residuos en la cadena de producción, desde el cultivo hasta el consumo final. Estos, si no se gestionan adecuadamente tienen impactos ambientales, como emisiones de gases de efecto invernadero, que favorecen el cambio climático, entre otras (UNEP, 2021). En el año 2022, México cosechó 181,706.42 ton de fruto de café (FAOSTAT, 2022), donde el 95% en peso son residuos conformados por borra, pulpa y cascarilla (Gobierno de México, 2024),

Por otro lado, los residuos de café son una fuente de celulosa alterna para la producción de papel, evitando así la necesidad de utilizar pulpa de madera y reduciendo la cantidad de energía requerida para el proceso de fabricación, considerando que su uso contribuye a la economía circular y se disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera debida a su descomposición. Por ello, el objetivo de este proyecto es proponer un proceso sostenible para elaborar papel reciclado, adicionado con celulosa extraída de residuos de café.

1. FUNDAMENTOS

Ante la necesidad de proponer alternativas sostenibles, el reciclaje de papel y la investigación en fuentes alternativas de celulosa han cobrado especial interés y auge en su investigación y desarrollo (Jacobo, 2025). Un enfoque innovador y prometedor es la extracción de celulosa a partir de residuos de café, un material abundante y subutilizado que podría ofrecer una solución ambientalmente responsable.

Por ello se aborda los antecedentes sobre el reciclaje de papel, explora el potencial del residuo de café como fuente de celulosa, así como los métodos de caracterización y extracción de celulosa, proporcionando una visión general de cómo estos esfuerzos pueden contribuir a la sostenibilidad en la industria papelera.

1.1 ANTECEDENTES

Las diversas investigaciones con respecto al reciclaje del papel y a la celulosa extraída de residuos de café como alternativa para la producción de papel, se exponen los siguientes argumentos en orden cronológico por temáticas de importancia, desde el reciclaje del papel, usos, aplicaciones, caracterización y extracción de celulosa, así como su normatividad.

En la tabla 1.1 se enlistan trabajos enfocados en el proceso de extracción de celulosa de fuentes alternativas a la madera y opciones del uso de residuos agroindustriales de la industria cafetalera y las características de la celulosa.

Tabla 1.1 Artículos fuentes no maderables para extracción de celulosa

CITA	TITULO	RESUMEN
López, et al. (2025)	Subproductos del café (<i>Coffea</i>): desafíos ambientales y oportunidades para la bioeconomía	Resaltan la urgencia de aplicar la economía circular en la caficultura, transformando estos subproductos en bioenergéticos, bioplásticos y biofertilizantes mediante biotecnología. Se subraya el éxito de algunas iniciativas y la necesidad de políticas públicas que fomenten un aprovechamiento sostenible, impulsando la bioeconomía y reduciendo el impacto ambiental.

Tabla 1.1 Artículos fuentes no maderables para extracción de celulosa (*continuación*)

CITA	TITULO	RESUMEN
Sánchez. (2025)	Un enfoque de valorización sostenible del licor negro Kraft de <i>Robinia pseudoacacia</i> L.: precipitación de lignina seguida de extracción de fenoles con solventes verdes del licor designificado	El licor negro Kraft, derivado de la pulpa de <i>Robinia pseudoacacia</i> L., se valoró como fuente renovable de lignina y fenoles, evitando su incineración. La lignina se aisló por acidificación y la fase residual se sometió a extracción líquido-líquido con solventes. La lignina recuperada (85%) presentó alto contenido fenólico y bajo peso molecular, con buena actividad antioxidante y extractos que mostraron actividad antioxidante correlacionada con su contenido fenólico. Destacan los flavonoides dihidro-robinetina y robinetina, con potencial para aplicaciones industriales.
Soyama. (2025)	Extracción simultánea de ácido cafeico y producción de microfibrillas de celulosa a partir de posos de café mediante cavitación hidrodinámica en un tubo Venturi.	Evaluó el uso de cavitación hidrodinámica, mediante un tubo Venturi, para extraer ácido cafeico y generar microfibrillas de celulosa de forma continua y eficiente. Se optimizaron las condiciones del proceso midiendo la intensidad de cavitación, influida por la presión antes y después del tubo. Además, se empleó fotografía de alta velocidad para analizar el tipo de cavitación generado.
Abolore. (2024)	Métodos de pretratamiento ecológicos y sostenibles para la extracción de celulosa a partir de biomasa lignocelulósica y sus aplicaciones: una revisión	Realizan una revisión de fuentes que estén desarrollando métodos ecológicos más suaves y sostenibles, evaluados según su eficacia, impacto ambiental y viabilidad económica con respecto a la extracción de celulosa de distintas fuentes. Esta revisión aborda estas técnicas verdes para el proceso y resalta su potencial como materia prima versátil en la bioeconomía.
Ostadi Moghadam y Moeenfar. (2024)	¿Cómo afecta el tamaño de las partículas de café molido a las propiedades fisicoquímicas de las nano esferas de celulosa aisladas?	Evaluaron cómo el tamaño de partícula de posos de café usados (SCG) afecta las propiedades de la nano celulosa obtenida tras purificación alcalina, blanqueo, hidrólisis ácida y ultrasonidos. Se analizaron tres rangos de tamaño (A: 850-1000 μ m, B: 500-850 μ m, C: 350-500 μ m). La nano celulosa resultante mostró variaciones en diámetro (49-65nm), potencial ζ (-44 a -40mV), contenido de azufre y estabilidad térmica, mientras que la cristalinidad y tamaño de cristal permanecieron constantes. Los resultados sugieren que elegir el tamaño de partícula adecuado es clave para optimizar la nano celulosa según la aplicación.
Vera & Gabriela. (2024)	Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del papel Kraft obtenido a partir de la biomasa lignocelulósica de la cascarilla de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) tras someterse a un proceso de blanqueo con peróxido de hidrógeno.	Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de papel Kraft elaborado con cascarilla de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) y blanqueado con peróxido de hidrógeno en distintas concentraciones (0-50%) junto con bagazo de caña. La cascarilla mostró un 42.33% de lignina y 24.82% de celulosa, destacando la variedad Nacional. La incorporación de bagazo mejoró la celulosa y estabilidad del papel, mientras que el blanqueo al 50% aumentó la blancura. Sin embargo, la baja resistencia a la tracción limita su uso como papel bond, recomendándose optimizar el prensado para mejorar sus propiedades mecánicas.

Tabla 1.1 Artículos fuentes no maderables para extracción de celulosa (*continuación*)

CITA	TITULO	RESUMEN
Cifuentes. (2023)	Comparación de la composición química de la pulpa de café a dos altitudes de siembra en la Región Occidental de Guatemala para uso en la fabricación de papel.	Se evaluó el uso de pulpa de café para fabricar papel, analizando su contenido de celulosa, lignina y extraíbles, así como el efecto de la altitud de siembra en la calidad del material. Se compararon muestras de Santa Ana Huista, Guatemala, cultivadas a 1290 y 1560 msnm. La pulpa de mayor altitud presentó más celulosa (54.06 % vs. 52.92 %) y menos lignina y extraíbles, resultando en hojas de papel con mejor color y textura, además de menor costo de producción. Esto indica que la altitud influye positivamente en la calidad de la pulpa y del papel elaborado.
Hernández & medina. (2023)	Revalorización de residuos de café: avances en el desarrollo de envases alimentarios ecológicos de base biológica.	Analizan avances en películas y envases biodegradables hechos con subproductos del café, como harina, mucílago, cascarilla y posos usados. También aborda técnicas industriales comunes, como extrusión y moldeo, junto con métodos de laboratorio. Finalmente, se discuten las oportunidades y limitaciones del uso de biomateriales derivados del café en aplicaciones comerciales.
Faria. (2020)	Producción de nano cristales de celulosa a partir de fibras de corona de piña mediante pretratamiento alcalino e hidrólisis ácida en diferentes condiciones.	Obtuvieron nano celulosa a partir de coronas de piña mediante hidrólisis ácida, tras un pretratamiento con hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno. La caracterización química y mediante microscopía mostró una reducción efectiva de lignina y hemicelulosa, y la formación de nanopartículas con un ancho promedio de 10.38 nm.
Cogua. (2019)	Estudio de la borra de café para su uso en formulaciones de liberación controlada de nutrientes	Evaluó el uso de borra de café como base para fertilizantes de liberación controlada (FLC). Se caracterizaron sus propiedades estructurales y superficiales, como área específica, análisis elemental, CIC, grupos funcionales y puntos de carga. Tras incorporar nutrientes NPK y cuantificar su contenido, se evaluó la capacidad de retención de las formulaciones agrícolas. El estudio concluyó que es posible desarrollar FLC a partir de borra de café mediante procesos simples.
Mues. (2018)	Determinación de costos para la producción de celulosa mediante método Kraft y mecánico	Datos de costos operativos y de inversión para producción de celulosa con método Kraft y mecánico. Estudio de actividades de proceso productivo, considerando los recursos que se sacrifican en cada caso. Proponen ecuaciones del cálculo de costos.
Musule. (2016)	Composición química de la biomasa lignocelulósica en la madera de Abies religiosa a lo largo de un gradiente altitudinal.	Estudiaron la composición lignocelulósica de Abies religiosa a partir de muestras de 36 árboles cultivados entre 3000 y 3500 msnm. Usaron análisis gravimétricos y espectroscopía FTIR, encontrando un contenido promedio de 54.81% de celulosa, 12.37% de hemicelulosa y 24.68% de lignina insoluble. El análisis estadístico (ANOVA y componentes principales) reveló diferencias significativas en la hemicelulosa y lignina a 3100 y 3200 msnm, aunque sin un patrón lineal con la altitud, lo que sugiere una influencia de factores ambientales complejos.

Tabla 1.1 Artículos fuentes no maderables para extracción de celulosa (*continuación*)

CITA	TITULO	RESUMEN
Aguilar. (2014)	Papel amate de pulpa de café (<i>Coffea arabica</i>) (Residuo de beneficio húmedo)	Caracterizaron una muestra de pulpa de café usando normas TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) para evaluar su calidad como materia prima en la fabricación de papel artesanal. Los resultados indicaron que la pulpa de café posee propiedades estructurales y químicas que facilitan la producción de papel, con características de adhesión y formación de fibras similares a las del papel amate hecho con corteza de árbol, logrando así una calidad comparable.
Romero, et al. (2014)	Determinación de los principales componentes de la biomasa lignocelulosica; celulosa, hemicelulosa y lignina de la paja de trigo para su posterior pretratamiento biológico	Caracterizó la paja de trigo del Valle de Mexicali para determinar los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, con el objetivo de evaluar su potencial en futuros pretratamientos biológicos con hongos. Se analizaron propiedades físicas (pH, humedad y cenizas) y químicas (nitrógeno total y compuestos extraíbles con acetona y agua), siguiendo métodos TAPPI. Tras eliminar los componentes minoritarios, se cuantificaron los principales: celulosa (57%), hemicelulosa (17%) y lignina (19%).
Lund. (2012)	Extracción alcalina de fibras de pulpa kraft: influencia en las propiedades de la fibra y la pulpa fluff	Evalúa el índice de resistencia a la tracción de las fibras obtenidas mediante extracción Kraft a diferentes concentraciones de NaOH teniendo que aumentó con bajas concentraciones. Las pulpas se desfibraron en seco a distintas intensidades para evaluar su desempeño, además las fibras de madera blanda mostraron mayor resistencia que las de abedul, aunque la pulpa de abedul tratada con más álcali fue la más resistente. Un mayor rizado en las fibras de madera blanda, causado por el alto nivel de álcali, generó redes más flexibles.

Dentro de los procesos de extracción de celulosa, el proceso Kraft es ampliamente utilizado en la industria papelera, este proceso requiere condiciones específicas de operación en temperatura, presión y alcalinidad, en la tabla 1.2 se enlistan documentos en los que se trabajó bajo diferentes condiciones de operación para la extracción de celulosa mediante el método Kraft.

Tabla 1.2 Referencias de condiciones de extracción Kraft en residuos agrícolas

CITA	TITULO	ESCALA	CONDICIONES P/ T/ t /AG / TP	REACT.	CELULOSA/ LIGNINA
Franco et al. (2025)	Evaluación de fibras de bambú blanqueadas como sustituto de la madera dura mediante la cocción de Kraft para aplicaciones de cartón	Digestor 1000 g	Presión máxima/ 160°C / 1.0 H / 500 rpm / 45mm	Lic bnco / Biomasa 4:1 / Prop H ₂ O 50:50	19.90% / 27.95%

Tabla 1.2 Referencias de condiciones de extracción Kraft en residuos agrícolas (continuación)

CITA	TITULO	ESCALA	CONDICIONES P/ T/ t /AG / TP	REACT.	CELULOSA/ LIGNINA
Rodríguez & Blandino. (2022)	Pulpa de celulosa a partir de cascara de café (<i>Coffea arabica</i>) por el método alcalino	Pruebas 20 g	Atmosférica/ 40, 65 y 90°C / 60,135 y 240min / sin AG / ≤2mm	NaOH 9, 14 y 19% / H ₂ O NR	97.50% / NR
Pereira et al. (2021)	Efecto del tratamiento químico de la fibra de corona de piña en la producción, composición química, estructura cristalina, estabilidad térmica y propiedades cinéticas de degradación térmica de materiales celulósicos.	VPP 1 L	Atmosférica / 70°C / 1 H / 500 rpm / 1-2 mm	NaOH 4% / Prop H ₂ O 1:20	17.40% / 24.30%
Ravindran et al. (2019)	Nuevos parámetros de procesamiento para la extracción de nano fibras de celulosa (CNF) a partir de fibras de hojas de piña ambientalmente benignas (PALF): Relaciones estructura-propiedad	VPP 1 L	Atmosférica / 100°C / 4 H / NR / NR	Lic bnco al 2%	81.20% / 3.46%
Yuan et al. (2016)	Efecto de la preextracción alcalina de hemicelulosas y sílice en la pulpa Kraft de bambú (<i>Neosinocalamus affinis</i> Keng)	Reactor de acero inoxidable de 300 mL	Presión Máxima/ 165°C / 1-5 H / sin AG / ≤2mm	NaOH 6,12,18% / H ₂ O relación 8L / Kg	NR / 28.50%
Vega, (2004)	Extracción de fibra corta de alfa celulosa a partir de la borra de café	Reactor 3 L / 225 g borra de café	Presión Máxima/ 100, 130 y 150 °C / 2.0, 3.0, 3.5 H / sin AG / tamiz 80	NaOH 6:1/ H ₂ O 1.5 L	33% / NR
García, (1999)	Extracción de celulosa a partir de la borra de café	Reactor piloto de 30 L, cal indirect con vapor	Presión máxima /Temperatura máxima / 2.4, 3.0, 3.6 y 4 H / NR /tamiz 60	Relación 6:1 con relación a la borra de café	95.09% / 8.72%

1.2 PRODUCCION Y CARACTERISTICAS DE PAPEL

El papel ha sido una herramienta esencial en la comunicación y registro de la humanidad desde hace siglos, a partir de su invención, el papel y su proceso de producción ha evolucionado de ser un material exclusivo y costoso a un recurso, accesible y fundamental para la sociedad. Sin embargo, su fabricación y consumo masivo plantean serios desafíos ambientales, lo que motiva un análisis detallado sobre su impacto y posibles alternativas sostenibles.

1.2.1 Papel y celulosa

Desde el contexto histórico el papel ha sido fundamental para el avance de la sociedad, se convirtió en un medio de transporte y preservación de la información (Sadurní, 2022). Las culturas y sociedades han intentado preservar datos, desde las pinturas rupestres hasta el uso de pieles y hojas de árboles para su escritura, sin embargo, la historia ubica el origen del papel en el año 105 D.C. en China con Cai Lun, de la dinastía Han su composición fue de fibras de corteza de madera, bambú, ramio, cáñamo y trapo usado (Navarro, 2023).

La estructura fundamental de todas estas fibras son los compuestos lignocelulósicos mismos que brindan la materia prima para la fabricación de papel que es la celulosa, según la real academia española (RAE), se define como “un polisacárido que forma la pared de las células vegetales y es el componente fundamental papel” (RAE, 2014).

La celulosa es un polímero orgánico que funciona como base estructural importante de la pared celular primaria de plantas verdes y varias algas es el componente mayoritario de la pared celular, polímero tridimensional, que determina en las plantas el carácter de su fibra donde se tienen varios tipos de celulosa (Dhia, 2021).

- a) Alfa celulosa: Forma más rica y pura de celulosa, procedente de las capas internas de las paredes celulares de las plantas y altamente polimerizada es la fracción resistente a hidróxido de sodio (NaOH), se utiliza en producción de papel y fabricación de textiles.
- b) Beta celulosa: se encuentra en la capa intermedia de las paredes celulares de las plantas. Con polimerización y cristalinidad de menores niveles, es adecuada para operaciones que requieren flexibilidad.
- c) Gamma Celulosa: Amorfa grado de polimerización mínimo, que se encuentra en la última capa de la pared celular de las plantas y es poco estable estructuralmente en comparación otros tipos de celulosa, se utiliza mucho en aplicaciones que requieren una gran absorción de agua.

A partir de los productos con un alto contenido de celulosa madera, papeles recogidos, se obtiene la pulpa de papel cuyo proceso de obtención consiste en disociar fibras celulósicas que resistan tratamientos alcalinos agresivos (Rullifank, 2020).

La celulosa es el componente principal o de refuerzo de diferentes materiales siendo sus fuentes principales el algodón (90%), madera (50%) y cáñamo seco (57%), mismas fuentes tiene diversas aplicaciones en distintos campos industriales.

Se utiliza con frecuencia en la producción de papel y cartón o en productos derivados como celofán y rayón, además de una importante formulación de los textiles hechos de algodón o lino y en la industria farmacéutica.

La obtención de celulosa se lleva a cabo con la ayuda de diferentes procesos industriales, ya sea de forma mecánica o química. En el caso del aprovechamiento de papel, la pasta, celulósica, se obtiene a través de pasos de repulsión de los papeles y de eliminación de la tinta.

En el mercado del papel existe una amplia variedad que cuentan con características propias y particulares para diferentes usos lo que confiere al papel una versatilidad importante para cubrir diferentes necesidades, como se compila en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Clasificación de tipos de papel y sus usos

TIPO DE PAPEL	CARACTERÍSTICAS	PRODUCTOS
Reciclado ¹	Rugoso, poroso, color oscuro y opaco	• Productos ECO/Sostenibles
Bond o carta ²	Blanco, apto para escritura e impresión, superficie resistente al borrado, manipulación, plegado y archivo	• Libros • Libretas • Sobres
Kraft o estraza ²	Grueso y de color marrón	• Especialidades
Esmaltado o ilustración ¹	Tacto satinado, superficie tersa y brillante	• Catálogos • Revistas • Libros arte • Folletos • Flyers
Impresión o de fotocopia ²	Sin revestimiento, absorción por porosidad	• Agendas • Libretas
Especiales ¹	Materiales adaptados a necesidades	• Especialidades

Tabla 1.3 Clasificación de tipos de papel y sus usos (*continuación*)

TIPO DE PAPEL	CARACTERÍSTICAS	PRODUCTOS
Cartulina ¹	Grueso y resistente	- Cubiertas - Calendarios - Estructuras - Carpetas
Creativo o arte ¹	Características especiales	- Catálogos - Acabados premium - Relieves - Libros arte
Prensa ²	A base de papel recuperado, blanco o ligeramente coloreado	Impresión de diarios
Registro ¹	Fibra larga	- Mapas - Registros de propiedad
Pergamino ²	Refinados con extraordinaria formación	Pieles para la escritura
Verjurado ²	Color blanco o en colores crema, marronáceos	Carta de prestigio
Seda ¹	Finas líneas paralelas a modo de marca de agua que se entrecruzan	- Envoltura alimentos - Fondos de cajas de fruta - Interior de cajas de zapatos - Farmacia y Perfumería
Cristal ²	Liso y resistente a las grasas, pastas químicas muy refinadas y subsiguientemente calandrado	- Empaquetados en perfumería - Confitería - Alimentación
Kraftliner ¹	Gran resistencia	- Recubrimiento papel - Cajas - Bolsas - Etiquetas de ropa
Fluting ²	Rigidez y amortiguación	- Parte ondulada - Cartón ondulado
Autoadhesivo ²	Permite que se pegue a otras superficies	- Publicitarios - Industriales - Embalaje - Etiquetado
Tisú ¹	Bajo gramaje, suave, fibras naturales	- Servilletas - Papel higiénico - Papel de cocina
Térmico ¹	Reactivo al calor, impresión térmica directa	- Impresión de tickets - Boletos - Vouchers - Recibos
Permanente ²	Resiste cambios físicos y químicos durante un largo periodo de tiempo	- Montajes ligeros de museo - Carpetas de archivo
Moneda ¹	Resistencia a la abrasión y el manchado	Billetes
Secante ¹	Absorbente	Herramienta de belleza
Filtro ²	Manejo de soluciones con pH entre 0 y 12 y temperaturas hasta 120°C	Filtrar soluciones en laboratorio
Liar ²	Poco gramaje, consume rápido	Cigarro

Tabla 1.3 Clasificación de tipos de papel y sus usos (*continuación*)

TIPO DE PAPEL	CARACTERÍSTICAS	PRODUCTOS
Biblia ¹	Opaco, fino, muy resistente a tensión, tirones y dobleces	• Impresión de libros gruesos • uso intenso
Pretex ²	Resistencia al desgarro, impermeable y transpirable	• Impresión dorsal • Planos de senderismos
Piedra ²	Impermeable, resistente y anti-grasa, no proviene de fibras vegetales	• Bolsas • Envoltorios de jabón • Mapas
Cartoncillo ¹	Material compacto a base de pasta virgen y/o papel recuperado, de varias capas	• Estuches plegables • Envases
Cartón compacto ¹	Diversas hojas pegadas entre sí, con un grosor de 3 o 4 milímetros	• Cajas y envases de mercancías
Cartón plumo ¹	Material ligero y fácil de cortar para montar impresiones	• Enmarcar imágenes • Modelos a escala

Fuente: ¹García, 2024; ²Mar, 2022

1.2.2 Producción y composición del papel

El Papel en esencia, es producto de fibras vegetales extraídas mecánica o químicamente que son unidas entre sí después del proceso industrial, antaño, el proceso de la producción de papel era muy artesanal, donde la corteza se ablanda a base de golpes y posteriormente con agua y cal para remover sabia y poder formar hojas sobre tablas planas que dejaban secar al aire, para posteriormente usarlas como papel.

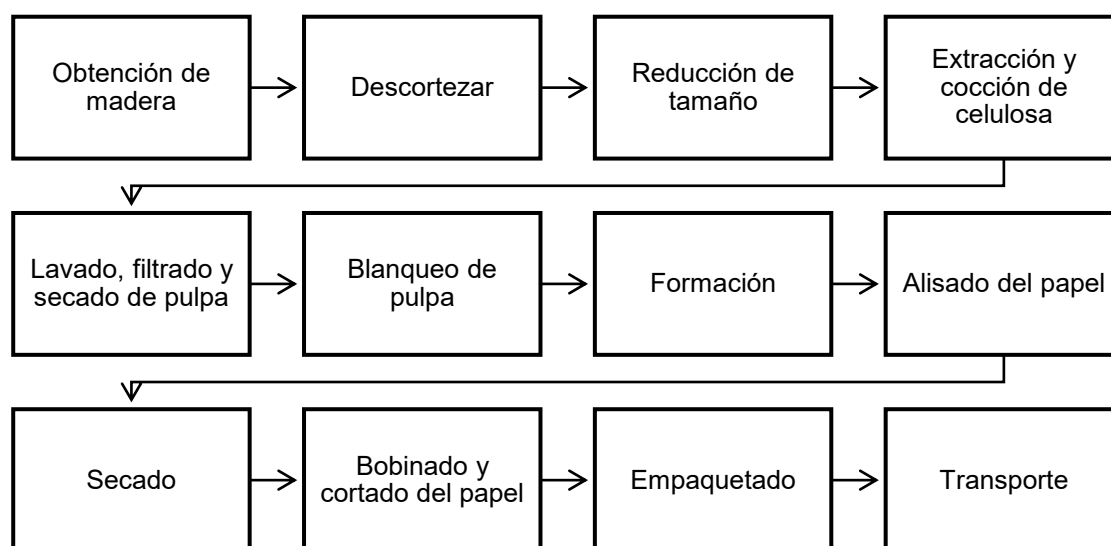
En el contexto actual la producción de papel está altamente industrializada, debido a la alta demanda del producto, así como el avance tecnológico, las empresas enlistadas en la tabla 1.4 lideran el mercado global gracias a su capacidad de producción, innovación tecnológica y compromiso con la sostenibilidad.

Sin embargo, los procesos han cambiado junto con el desarrollo humano, la industrialización del proceso de producción de papel y comprende nuevas etapas y técnicas que facilitan su producción y mejoran el producto final como se presenta en la figura 1.1 (Makertan & Makertan, 2023).

Tabla 1.4 Empresas líderes en producción de papel a nivel mundial 2023

EMPRESA	PAÍS DE ORIGEN	INGRESOS APROXIMADOS (USD)	ENFOQUE DESTACADO
WestRock	Estados Unidos	\$20.3 mil millones	Embalaje sostenible y cartón
International Paper	Estados Unidos	\$18.9 mil millones	Pulpa, cartón y productos de fibra
Smurfit Kappa Group	Irlanda	\$12.35 mil millones	Soluciones de empaque ecológicas
UPM	Finlandia	\$11.44 mil millones	Bioindustrias forestales
Oji Holdings Corporation	Japón	\$10.9 mil millones	Gestión forestal y papel funcional

Fuente: Greycon, 2023



Fuente: Makertan & Makertan, 2023

Figura 1.1 Proceso industrial de producción de papel

- Obtención de madera: Tala de árboles y recorte de ramas, con la intención de trabajar solo con el tronco principal.
- Descortezar: Eliminación de capa exterior mediante fricción para trabajar únicamente la madera del tronco.
- Reducción de tamaño: Se seccionan los troncos para su reducción de para facilitar la extracción de las fibras en los posteriores tratamientos.

- d) Extracción y cocción de celulosa: Tratamiento con productos químicos como agua, sulfato de magnesio, o de sodio, con la intención de eliminar fibras indeseables de madera (lignina), dejando únicamente pulpa de celulosa.
- e) Lavado, filtrado y secado de pulpa: Sustraer la pulpa del agua, para su reutilización en el proceso, así como para la limpieza de las fibras, eliminando agentes externos o contaminantes.
- f) Blanqueo de pulpa: Eliminación de la lignina no eliminada en el proceso de extracción, puede con dióxido de cloro, ozono, enzimas, peróxidos, Inclusión de Cl_2 y O_3 para conseguir colores más blancos en la producción de papel.
- g) Formación: Se coloca la pulpa sobre mallas metálicas que se desplazan para que la pulpa se seque y tome la forma deseada.
- h) Alisado del papel: El papel obtiene el espesor establecido pasando entre unos rodillos giratorios cubiertos de fieltro para eliminar el agua restante y finalmente pasa por otros rodillos que le otorgan la textura adecuada.
- i) Secado: Se hace pasar el papel prensado por rodillos calientes que realizan una última etapa de secado en la que se aplica calor al papel mediante cilindros.
- j) Bobinado y cortado del papel: El bobinado facilita el manejo y transporte del papel en grandes volúmenes, mientras que el corte permite adaptar el papel a las necesidades específicas de los usuarios finales, como controles estrictos de calidad y seguridad para asegurar productos finales de alta calidad.
- k) Empaquetado: Empaqueta con películas de plástico mediante un meticuloso proceso que garantiza que el papel llegue a su destino en perfectas condiciones.

- l) Transporte: Desde la fábrica es una operación que requiere una planificación y una ejecución precisa para asegurar que el papel llegue en perfectas condiciones a su destino.

El proceso convencional de extracción de celulosa inicia con la extracción de materia prima que son fuentes lignocelulósicas que principalmente son los árboles de bosques, que son transportados a fábricas de celulosa, donde se descaskan y cortan en trozos pequeños.

Tras reducir los troncos, los fragmentos de madera se convierten en una masa fibrosa mediante el proceso denominado 'pulping'. En esta fase, la madera se somete a una cocción con agentes químicos, como sulfato de sodio o hidróxido de sodio, lo que permite separar las fibras de celulosa del resto de componentes. Posteriormente, la pulpa de celulosa obtenida se somete a un blanqueo para eliminar impurezas, principalmente lignina y hemicelulosa, logrando así un color más claro y homogéneo (Dhia, 2021).

1.2.3 Proceso de extracción Kraft

La digestión Kraft es un proceso de extracción de fibras naturales que se lleva a cabo gracias al uso de agentes químicos, además de ello esta se realiza a altas temperaturas, entre 170°C en adelante, y a presiones muy altas, de alrededor de nueve atmósferas, los químicos de cocción primaria en el proceso Kraft son el hidróxido de sodio (NaOH), sulfuro de sodio (Na₂S), sulfato de sodio (Na₂SO₄), carbonato de sodio (Na₂CO₃) (Vega, 2004).

La recuperación del licor negro, compuesto por lignina y residuos químicos de la pulpa, constituye una etapa fundamental del proceso Kraft. Este licor se concentra de un 15% a un 65% de sólidos mediante evaporadores, manteniéndose caliente para disminuir su viscosidad y facilitar su manejo como fluido.

Posteriormente, se le añade Na₂SO₄ y se quema en un horno de recuperación diseñado específicamente para este fin. En la parte superior del horno, el licor negro se incinera, generando calor que se aprovecha para producir vapor y energía eléctrica.

La ceniza resultante, formada por carbonato de sodio y sales, se reduce a Na_2S en la cama de carbón ubicada en la zona inferior de la caldera. Esta ceniza reducida se disuelve en agua, originando el denominado licor verde.

Antes de reutilizarse en el digestor, el licor verde debe transformarse en licor blanco mediante el proceso de recaustificación. Este inicia con carbonato de calcio (CaCO_3) crudo, que se calcina en un horno rotatorio para obtener óxido de calcio. Dicho óxido se hidrata con agua, formando cal apagada.

El licor verde se mezcla con la cal apagada en el apagador, donde el carbonato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio, produciendo NaOH y carbonato de calcio. Este último precipita como lodo de cal, mientras que el licor blanco se clarifica para eliminar impurezas y se bombea nuevamente hacia la planta de celulosa. El lodo de cal se retorna al horno rotatorio para regenerar la cal (Mués, 2021).

La recuperación de las pérdidas de sodio y azufre se efectúa en el horno de recuperación mediante la adición de sulfato de sodio, mientras que en la etapa de recaustificación se emplea carbonato cálcico fresco en el horno de cal

Para mejora algunas propiedades del papel como lisura, opacidad, blancura, brillo, uniformidad de absorción de tinta y estabilidad dimensional, aditivos como carbonato de calcio, caolines, talco, yeso, bentonita, pigmentos coloreados, estos se agregarse en masa a la pulpa antes de la fabricación del papel en cantidades apreciables de hasta 2.0%, pueden determinarse en forma global como cenizas del papel (Zanuttini, 2008).

El papel bond es de alta calidad y es usado debido a su versatilidad para el usuario, está compuesto principalmente por fibras celulósicas y aditivos, la celulosa proviene del algodón donde entre 25% y 100%, si es menor al 100% se recurre a fibras de madera como complemento para brindar mayor resistencia (Staff PCM, 2023).

Este papel es comercializado en 3 medidas principales: “de 66 cm x 96 cm, 60 cm x 150 cm 21.59 cm x 27.9 cm (tipo carta), 21.59 cm x 35.56 cm (tamaño oficio), el gramaje más común es 60 g/m², 75 g/m² y 90 g/m² “(Papelera panamericana, 2021).

Es importante no exceder el uso de aditivos ya que cuenta con tamaño de partículas entre 0.3–5 µm, dimensiones que son mucho menores a la de las fibras, su presencia reduce el nivel de enlace entre fibras, y el papel resulta así más flexible y débil.

Tabla 1.5 Cantidad y tipos de aditivos para papel

PAPEL	CONTENIDO (%)	TIPO DE CARGA
Diario	0-10	Carbonato, caolín, talco, pigmentos especiales
Revistas	20-30	Caolín, Talco
Papeles finos	0-25	Carbonato, caolín, talco, yeso
Papel de envoltura	0-10	Carbonato, caolín, talco, yeso
Línea blanca reciclada	10-25	Principalmente Carbonato

Fuente: Zanuttini, 2008

Por esto, un nivel de aditivos del 50% de un caolín reduce la resistencia de la estructura, desgaste, al corte y tiende a liberar polvo, por ello se sugiere un límite máximo a utilizar de acuerdo con el tipo de papel, como se muestra en la tabla 1.5.

1.2.4 Normatividad e índices de calidad en la industria papelera

Para todo proceso industrial existe legislación en su producción, con la finalidad de garantizar su estandarización y con ello la satisfacción del cliente, la optimización de los recursos, calidad del producto, cuidado del medio ambiente y que el proceso sea repetible.

En México, las principales normas son las que se exteriorizan en la tabla 1.6, estas normas están basadas en las normas TAPPI donde se establecen las técnicas para la caracterización tanto de la pulpa de la madera para la producción del papel, como de los parámetros a evaluar para papel y cartón, además mencionan los métodos a seguir, las necesidades para clasificar y considerar el papel como reciclado, y su correcto etiquetado para su venta y distribución.

Tabla 1.6 Normatividad mexicana para papel

NORMA	TÍTULO
NOM-N-60-C-1982	Productos para oficinas y escuelas hojas de papel bond para maquinas fotocopadoras, especificaciones.
PROY-NMX-AA-144-SCFI-2008	Características y especificaciones técnicas del contenido de fibra de material reciclable y cloro para la fabricación de papel para impresoras y fotocopadoras que sea adquirido por las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal
NMX-N-107-SCFI-2010	Industrias de celulosa y papel, contenido mínimo de fibra reciclada de papel para la fabricación de papel periódico, papel para bolsas y envolturas, papel para sacos, cartoncillo, cajas corrugadas y cajas de fibra sólida especificaciones, evaluación de la conformidad y eco-etiquetado.

De las normas mencionadas en la tabla 1.6, la NMX-N-107-SCFI-2010 referencia a las normas TAPPI que enlista parámetros de calidad del papel industrial, indicando respectivamente sus unidades, métodos de ensayo y sus especificaciones para las pruebas necesarias.

1.3 PRODUCCION Y RESIDUOS DE CAFÉ

El proceso de producción del café comienza cultivo y cosecha de las cerezas del fruto, se procede con el despulpado para posteriormente tostar y moler los granos para su comercialización y consumo final. Dentro de los principales subproductos se tienen la pulpa, la cascarilla y la borra, que al ser desechados sin tratamiento liberan gases de efecto invernadero, además de lixiviados que afectan las fuentes hídricas, los suelos, la biodiversidad y los ecosistemas.

1.3.1 Cultivo y cosecha de café

El proceso inicia desde el cultivo y la maduración del fruto del café, una vez que este es cosechado, se procede con la eliminación de los componentes externos del fruto o cereza, hasta la aparición del grano, a este proceso se le llama despulpado y se puede realizar por el método húmedo y seco.

El método húmedo consta en la implementación de agua para remover la pulpa del fruto del café y obtener el grano; se emplea principalmente para la especie Arábica, destinado a cafés de alta calidad, ya que permite un mayor control del perfil sensorial.

A diferencia del método seco, que consiste en el secado de la cereza completa del café sin remover previamente la pulpa, esta técnica se destina para la especie robusta, que está destinado para cafés solubles (Núñez, 2021).

En este proceso se elimina toda la parte externa del fruto, esto representa el 50 % de peso total del fruto e incluyen la piel (7-8%), la pulpa/cáscara (41 y 29% respectivamente); posteriormente el grano del café es tostado y de este se desprende la piel plateada o cascarilla que corresponde al tegumento del grano de café (1.2 %), siendo el principal residuo de tostado. (Figura 1.2)

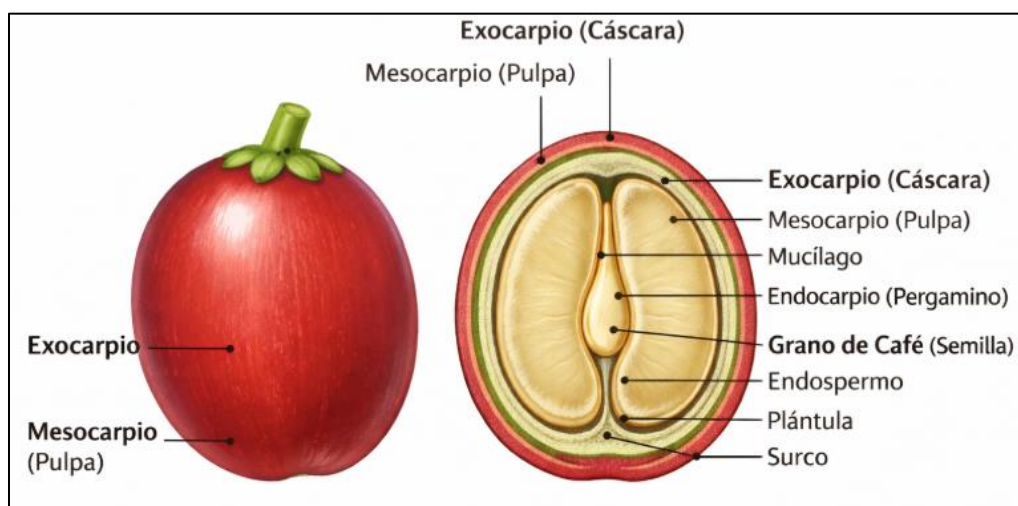


Figura 1.2 Estructura del fruto del café

1.3.2 Producción de café

En el año cafetero 2010/11, la producción mundial fue de 131 millones de sacos de 60 kg (equivalente a 7.8 millones de toneladas), Para 2015/16, la producción aumentó a 143.4 millones de sacos. En la tabla 1.7 se muestran los grupos de café mayormente producidos por año. (Janissen & Huynh, 2018; Mussatto et al., 2011).

Tabla 1.7 Producción de café por grupos y años de cosecha (en miles de sacos)

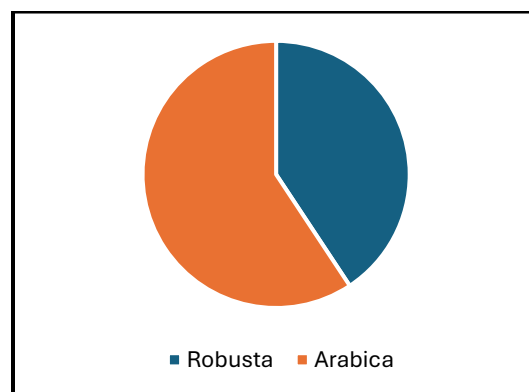
GRUPOS DE CAFÉ	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	PARTICIPACIÓN DEL TOTAL PRODUCCIÓN 2014/15 (%)
Producción total	136,571	147,615	146,630	143,252	100.0
Arábicas	82,007	88,370	87,010	84,999	59.3
Arábicos lavados	40,565	40,456	40,317	41,187	28.8
Suaves colombianos	8,720	11,523	13,488	14,656	10.2
Otros suaves	31,845	28,933	26,829	26,531	18.5
Brasileños naturales	41,442	47,914	46,693	43,812	30.6
Robustas	54,564	59,245	59,620	58,253	40.7

Según la clasificación de la Organización Internacional del Café (OIC), los países se agrupan por el tipo predominante de café, estos países se exponen en la tabla 1.8

Tabla 1.8 Calidades de café y principales productores OIC

GRUPO DE CALIDAD OIC	PAÍSES PRODUCTORES PRINCIPALES
Arábicas suaves colombianos	Colombia, Kenia, Tanzania
Otros arábicas suaves	México, Guatemala, Perú, Honduras, Nicaragua, Costa Rica, Bolivia
Arábicos naturales brasileños	Brasil, Etiopía, Paraguay
Robusta	Uganda, India, Indonesia, Vietnam, República Democrática del Congo

En las cosechas del año cafetalero 2013/14 y 2014/15, la especie arábica representó el 59.3% de la producción mundial, mientras que robusta el 40.7%. De la producción mundial de café registrada por la OIC entre los años 2013/14 y 2014/15, el 59.3% correspondió a la especie arábica y 40.7% a los robusta.



Tomado de (Figuerola, 2019)

Figura 1.3 Producción mundial de café por especie

En la figura 1.3 se ilustra de forma gráfica la producción mundial de café por especie en el año cafetalero la producción mundial de café (2013/14) (Figuroa, 2019) considerando los países que dominaron la producción de café como se muestra en la tabla 1.9

Tabla 1.9 Países dominantes en producción de café año 2013/14

PAÍS	PRODUCCIÓN (MILLONES DE SACOS DE 60 kg)
Brasil	66.4
Vietnam	30.1
Colombia	12.9
Indonesia	10.9
Total, mundial	174.9

El consumo global se estima en 168.1 millones de sacos, con la Unión Europea y China como principales impulsores. Se espera un excedente de 1 millón de sacos para el ciclo 2014/15. Por otro lado, en el caso de la producción de café en México según la secretaria de agricultura y desarrollo rural enlista los estados con mayor producción Tabla 1.10

Tabla 1.10 Producción de café en México

ESTADO	PRODUCCIÓN (%)	PRODUCCIÓN (TONELADAS)
Chiapas	41%	352,867
Veracruz	24%	206,867
Puebla	15.3%	154,691
Total, nacional	100%	878,913

México ocupa el 11º lugar mundial en producción y el 12º como exportador. El café emplea a más de 500,000 productores en 15 estados y 480 municipios (INCAFECH, 2025). El cultivo se enfoca en *Coffea arabica*, la especie más cultivada en México por su calidad en taza y adaptación al trópico húmedo. La producción de café en México se agrupa en tres grandes regiones cafetaleras que son:

- a) Región Vertiente del Golfo: San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla, Estado de México y Veracruz.
- b) Región Vertiente del Océano Pacífico: Colima, Guerrero, Jalisco, Nayarit y Oaxaca.
- c) Región del Soconusco: Chiapas

La planta de café se clasifica dentro del orden Rubiales, perteneciente a la familia Rubiáceas y al género *Coffea* (*Larière*), el cual comprende más de cien especies reconocidas. Sin embargo, en el ámbito comercial únicamente se cultivan tres: *Coffea arabica* *Larière*, *Coffea canephora* *Pierre ex A. Froehner* (conocida como *Robusta*) y *Coffea liberica* *Hiem*. Esta especie produce frutos denominados cerezas, que presentan un color verde durante su estado inmaduro y adquieren tonalidades rojas o amarillentas al alcanzar la madurez (Aguilar, 2014).

En el caso de México, los cultivares más comunes son Typica, Bourbon, Caturra Rojo, Mundo Novo, Garnica y Caturra Amarillo. La producción promedio de estas variedades, medida en frutos frescos o cerezas de café, suele ser inferior a siete sacos, unidad estándar utilizada en el comercio internacional de este producto.

1.3.3 Residuos de café

Los residuos en el proceso de cultivo e industrialización del café son del 95%, solamente se aprovecha el 5% del peso del fruto en la formulación de la bebida. La pulpa de café se produce en el despulpado del fruto y representa, en base húmeda, alrededor del 43 % del peso del fruto fresco (Rodríguez, 2007).

Además de este residuo, después del tostado del grano del café se genera la cascarilla y finalmente, después de la lixiviación del proceso para el consumo de la bebida se tiene el grano tostado molido que es conocido como borra de café.

Los residuos mencionados pueden transformarse en recursos valiosos mediante prácticas sostenibles, como el compostaje, la producción de biogás y la fabricación de materiales alternativos, contribuyendo a un enfoque más circular y sostenible (Abolore, 2024).

Estos residuos están formados por componentes como contienen ácidos fenólicos y flavonoides, con capacidad antioxidante, y pueden mejorar la estabilidad oxidativa de alimentos (Terán-Rivera et al., 2023). Además de contenido lignocelulósico, minerales, azúcares como se expone en la tabla 1.11

Tabla 1.11 Composición química residuos de café

Parámetro	Borra	Cascarilla	Pulpa
Humedad (%)	55 – 75	6– 12	10– 25
Cenizas (%)	4.0 – 8.0	3.0 – 7.0	11.0 – 18.0
Celulosa (%)	65 – 75	75 – 85	60 – 70
pH	4.0 – 6.0	4.5 – 5.5	5.0 – 6.0
Lignina (%)	20 – 30	15 – 25	80– 90
Extractivos (%)	20 – 30	5 – 10	10 – 20
Hemicelulosa (%)	30 – 40	20 – 30	15 – 25
Carbono total (%)	45 – 55	40 – 48	38 – 45
Nitrógeno total (%)	1.8 – 2.5	0.8 – 1.5	1.5 – 2.5
Grasas y aceites (%)	10 – 20	< 2	< 3
Azúcares (%)	< 2	< 3	10 – 20
Polifenoles (%)	1 – 2	0.5 – 1.5	2 – 4
Polisacáridos totales (%)	45 - 60	60 - 75	50 - 65
Proteínas (%)	10 - 15	6 – 10	8 - 12
Cafeína (%)	0.2 – 0.6	0.8 – 1.2	0.6 – 1.0
Materia orgánica (%)	90 – 95	85 – 90	88 – 92

Fuente: Hernández & medina. (2023), Lund. (2012), (Vega Ramírez, 2004), (García, 1999)

Si bien se consideran los residuos directos del cultivo y del fruto del café, existen residuos y daños aledaños durante el cultivo que generan impacto ambiental, desde el consumo de agua y el uso de pesticidas y fertilizantes, desde la germinación hasta el secado, como se enlistan en la tabla 1.12 (Teran, 2023). Además, existe generación de residuos a la hora de su comercialización y preparación, generando envases y filtros que son dispuestos directamente a rellenos sanitarios

Tabla 1.12 Impactos ambientales de la producción de café

ETAPA DEL PROCESO	TRATAMIENTOS O PRÁCTICAS	IMPACTOS AMBIENTALES
Germinación	Uso de fungicidas en sustrato	Contaminación del suelo
Almácigo	Aplicación de nematicidas, herbicidas, fertilizantes	Contaminación de suelo y agua; uso de bolsas plásticas
Siembra	Ahoyado en terrenos inclinados	Erosión
Mantenimiento	Deshierbe agresivo, fertilización química	Pérdida de fertilidad, erosión, contaminación hídrica
Control fitosanitario	Uso de insecticidas y fungicidas	Contaminación por residuos sólidos y químicos
Beneficio del café	Despulpado y lavado del grano	Generación de mucílago y pulpa; contaminación de agua y suelo
Secado del grano	Uso de silos sin calibración	Contaminación del aire

1.3.3 Caracterización de residuos de café

La aplicación tecnologías para la obtención de datos y tiene gran interés en el mundo actual, siendo de mucha importancia el perfeccionamiento de ciertas técnicas para determinación de componentes, de modo que sean capaces de brindar información o características de un componente de interés. Algunas de estas técnicas se describen en las normas TAPPI en las que se redactan los procesos de determinación de ciertos parámetros, como lo son la determinación de celulosas, pH, humedad, cenizas, compuestos volátiles, azúcares, entre otros.

Otro tipo de técnicas como la microscopia electrónica de barrido, que permite observar la estructura interna de la matriz y mediante la técnica FTIR (Fourier Transform, Infrared, spectrometric) es una técnica que permite la identificación de los compuestos lignocelulósicos que se puedan encontrar dentro de las diferentes matrices de residuos, tanto para la borra, la cascarilla y la celulosa (Orlando, 2011).

1.4 RECICLAJE

El reciclaje es una herramienta en la gestión de residuos consiste en recolectar, procesar y transformar materiales que de otra forma se desecharían, como el plástico, el vidrio, el metal y el papel, para darles una nueva vida útil. En el caso del papel, el reciclaje necesario debido a su alto consumo y su impacto en la demanda de recursos naturales.

1.4.1 PROCESO DE RECICLAJE DE PAPEL

La industria papelera y el reciclaje de papel desempeñan un rol fundamental en la sociedad, tanto desde una perspectiva económica como ambiental. En la implementación de la economía circular, el reciclaje del papel destaca su importancia, siendo este una alternativa sostenible para su producción, ya que el proceso es amigable con los recursos, como se muestra en la figura 1.4.

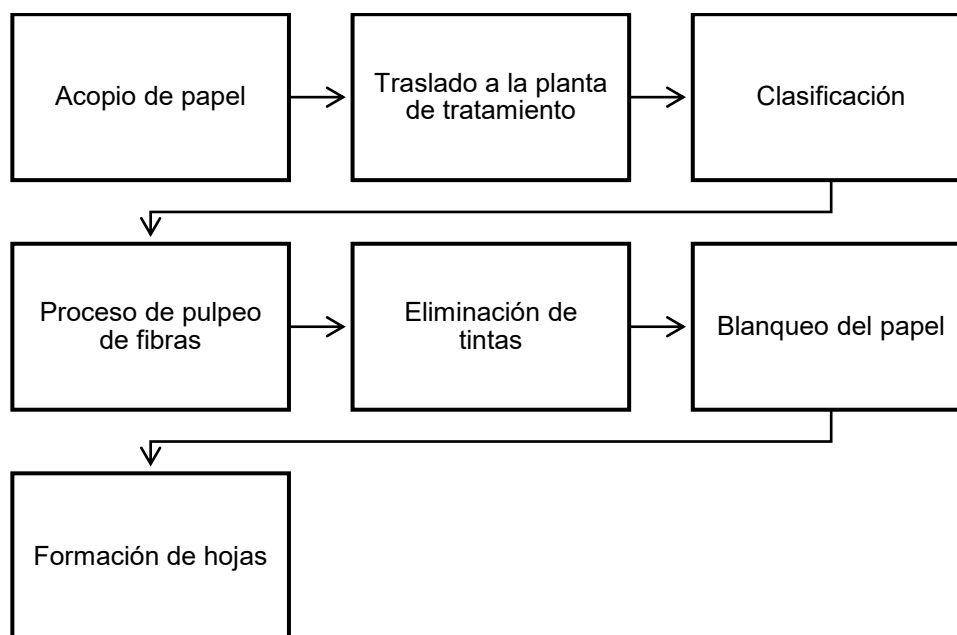


Figura 1.4 Proceso de producción de papel reciclado

Los pasos mencionados en la figura 1.4 se detallan a continuación con la finalidad de brindar la información de cómo llevar a cabo el proceso del reciclaje de papel, así como aclarar en que consiste cada una de las actividades del proceso (Fuentes, 2012).

- a) Acopio de papel: Se colocan estratégicamente centros de acopio para que la ciudadanía lleve residuos de papel usado, además de colocar contenedores en escuelas y oficinas.
- b) Traslado a planta de tratamiento: Se implementa un sistema de recolección periódica para los sitios donde se posicionan los contenedores y llevándolos a la planta donde serán reciclados química y mecánicamente.
- c) Clasificación: Es necesario que previo al proceso de reciclaje se haga una clasificación manual de los tipos de papel para evitar que se mezclen diferentes tipos de estos, además de una inspección visual en la que se retiran otros objetos como clips, grapas o cuerpos ajenos al papel.
- d) Pulpeo: Se colocan las hojas del papel usado en tanques con agitadores, sumergiéndolas en agua hasta que se forma una pasta, el pulper proporciona la fricción

entre fibra y fibra, haciendo remoción de las partículas de tinta de la superficie y reducir el tamaño de las partículas de tinta.

- e) Eliminación de tintas: Se lleva a cabo en una celda de flotación, en el cual se introduce la masa obtenida del pulpeo y por la parte inferior se introduce una corriente de aire que produce burbujas cuyo propósito es no solo de agitar la suspensión, sino, también separar las partículas de tinta del resto del pulpeo.
- f) Blanqueo: Las fibras de celulosa recuperada son sometidas a un tratamiento químico para eliminar restos de tinta que se preserven en el papel, así como la oxidación de la lignina, para esto se le adiciona a la mezcla gas cloro, ozono o hidróxido de sodio.
- g) Formación de hojas: Posteriormente se colocan las fibras de celulosa sobre un tamiz y es prensado para eliminar el resto de agua de las fibras y una vez que se seque se puede cortar para el tamaño de hoja deseado.

1.4.2 Características de papel reciclado

De acuerdo a la NMX-N-107-SCFI-2010, el papel reciclado está compuesto por masa celulósica obtenida a partir de materia prima recuperada, cuyo dueño desecha, y es susceptible de valorización evitando su disposición final considerando que no exista un gasto energético y sin perjuicio para la salud, los ecosistemas y sus elementos considerando un mínimo de contenido de celulosa de material recuperado para poder considerarlo como tal, ya que muchas veces necesita de células vírgenes o aditivos para un mejor nivel de calidad como se muestra en la tabla 1.13.

Estos porcentajes son necesarios para poder asignar una ecoetiqueta, con la leyenda “Papel reciclado. Por un mundo mejor”. La clave o código de la norma mexicana NMX-N-107-SCFI-2010, nombre y datos de la entidad verificadora, y código de la certificación.

El uso de la ecoetiqueta es intransferible a otras empresas o unidades operativas y su uso indebido se sancionará con la revocación de dicha certificación por un término de dos años.

Tabla 1.13 Contenido de material recuperado

PRODUCTO	% DE CONTENIDO MÍNIMO DE FIBRA RECICLADA
Cartoncillo	70
Papel para bolsas	80
Papel para envolturas	80
Papel para sacos	60
Papel periódico	70

Fuente: Secretaría de economía, 2010

1.4.3 Reciclaje como alternativa de producción

El reciclaje del papel en forma ya es una alternativa a la producción del papel, brindando un ahorro en el uso de recursos naturales y materia prima, así como participación en la economía circular de los productos, se estudia la valorización en temas energeticos de los rechazos, especialmente de plásticos, mediante gasificación para minimizar el impacto ambiental.

La gasificación de rechazos puede ser complementada con el uso de lodos de destinado. Si el proceso es viable, el gas pobre producido en la gasificación puede usarse en las calderas de cogeneración.

Concretamente, en lo relativo a la sostenibilidad dentro del proceso de reciclaje de papel, la mayor atención se focaliza en el reciclaje mientras que la reutilización y la reducción toman un papel secundario.

Sin embargo, es imperativo implementar estrategias para poder lograr que la economía circular que busca la industria y que es fundamental para la sostenibilidad facilite la reutilización o reciclaje de productos, trabajando desde la recogida o acopio para que esta no solo se limite a residuos que puedan tener valor para la empresa, teniendo así la incorporación del producto final en la materia prima y reduciendo el uso de recursos naturales.

1.5 SOSTENIBILIDAD

En 1987, la Comisión Brundtland de las Naciones Unidas en la comisión mundial sobre medio ambiente y desarrollo: nuestro futuro común define la sostenibilidad como la capacidad de la humanidad para asegurar que se satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades propias” (Naciones Unidas, 1987).

El término sostenibilidad (Morcillo, 2018), defiende el uso responsable de los recursos actuales de forma que no se vea comprometida la capacidad de las generaciones futuras de subsistir, teniendo en cuenta los recursos relacionados con el ámbito económico, el impacto en el medio ambiente y la sociedad, englobando cada uno de los procesos industriales y cotidianos a través de los cuales se genera valor en el flujo de bienes y servicios hasta el momento en el que llegan al usuario final

Hablar de sostenibilidad conlleva a desarrollo mundial existiendo condiciones particulares por la que no se puede unificar un sistema, sin embargo, el desarrollo sustentable está dirigido a responder diversos componentes que interactúan entre sí generando sistemas complejos.

Dichos sistemas consideran muchos componentes y a su vez muchas relaciones entre ellas se ha establecido que el desarrollo sostenible, tiene una connotación política, social, económica y ecológica (Madroñero, 2018) que establece la interacción de estos de manera tal que dicha interacción se dé de manera equilibrada.

Alrededor de la sostenibilidad y sus interacciones en la Agenda 2021 establece diferentes objetivos en los cuales el principal enfoque es hacia la mitigación del daño ambiental, para esto es necesario implementar nuevos sistemas económicos donde se implemente la circularidad de los productos y evitando que estos se conviertan en residuos o que los productores generen emisiones (United Nation, 2015).

El consumo de agua en los procesos productivos ha disminuido en forma importante como producto de las mejoras tecnológicas. Esto ha permitido que el consumo por tonelada de celulosa extraída sea de 40 m³ de agua, cuando en los años 80's, el consumo se encontraba entre 120 y 140 m³ (Peña, 2002).

La optimización en los procesos ha permitido reutilizar cerca del 95% del agua usada en el proceso o se purifica para reingresar a cuerpos pluviales, sólo un 5% se pierde por evaporación.

El aprovechamiento de fuentes de celulosa distintas a la madera contribuye a reducir tanto los costos energéticos como los asociados al tratamiento de desechos. Además, la sustitución de materias primas, al reemplazar los bosques de coníferas por cultivos como el plátano, permite alcanzar menores costos de producción y manejo. Paralelamente, esta práctica disminuye el impacto ambiental derivado de la deforestación y la contaminación de cuerpos de agua (Pellegrini, 2009).

Parte de las estrategias de sostenibilidad que se han implementado en la industria cafetalera propone implementar los residuos (pulpa de café) para compostaje, ya que representa el 80% del residuo generado tras la cosecha, mediante la inoculación de microorganismos nativos (Vázquez de Díaz, 2010). Datos que se explican en la tabla 1.14

Tabla 1.14 Compostaje de pulpa de café

CATEGORÍA	DATO O DESCRIPCIÓN
Producción de café en Colombia (2008)	12,524 sacos de 60 kg → Generaron 3,005 toneladas de pulpa
Volumen por biopila	175 kg de pulpa de café por pila
Duración compostaje tradicional	150 días
Duración compostaje acelerado	40 días con microorganismos nativos
Microorganismos utilizados	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>Citrobacter koseri</i> , <i>Bacillus spp.</i> , <i>E. coli</i> , <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> , <i>Cromobacterium spp.</i> , <i>Pseudomonas spp.</i>
Concentración de inóculo	3 × 10 ⁷ UFC/mL aplicado por aspersión en días 1, 10, 20 y 30
Relación C/N obtenida	Pila 1: 9.6%; Pila 2: 10%; Pila 4: 9.5%
Calidad sanitaria del compost	Libre de <i>Salmonella</i> , bajo en coliformes fecales
Beneficios agronómicos	Compost rico en nitrógeno, fósforo, hierro y potasio

Por otro lado, la sostenibilidad en la industria papelera, existen empresas que buscan estrategias para optimizar sus procesos implementando procesos amigables con el medio ambiente, algunas de estas se enlistan en la tabla 1.15

Tabla 1.15 Empresas uso de fuentes no maderables

EMPRESA	FUENTE PRINCIPAL DE FIBRA	PRODUCCIÓN ANUAL APROX	ENFOQUE SOSTENIBLE DESTACADO
Bio Pappel	Fibra reciclada posconsumo	+4.2 millones de toneladas	Economía circular, reciclaje de agua, carbono negativo
CEYPABASA	Celulosa 100% reciclada	52,800 toneladas	Energía limpia, certificación FSC, cogeneración eléctrica
Copamex	Celulosa reciclada y grado alimenticio	No especificado	Certificaciones ISO, reciclaje industrial integral
Fábrica de Papel Potosí	Fibra secundaria (papel recuperado)	No especificado	Producción de tissue, maquila ecológica, ISO 9001

La empresa Bio Pappel se destaca como el mayor productor de papel a partir de fuentes no maderables en América del Norte. Su modelo de sustentabilidad circular permite fabricar papel sin cortar árboles, utilizando principalmente fibra reciclada posconsumo proveniente del llamado “bosque urbano”, produce más de 4.2 millones de toneladas de papel sin usar madera, opera 29 plantas industriales en México, EE. UU. y Canadá, recicla agua en sus procesos, captura 8 veces más carbono del que emite, equivalente a eliminar 5.7 millones de toneladas de CO₂ al año (Morandín Ahuerma, 2023).

2. MÉTODO

El presente trabajo tuvo como objetivo proponer un proceso sostenible para elaborar papel reciclado, adicionado con celulosa extraída de residuos de café, por lo que la metodología, que se muestra en la figura 2.1.

Se elaboró como un mapa detallado que guio cada etapa del proceso, desde el acopio de los residuos a utilizar hasta la transformación final a papel reciclado, así como los tratamientos de los residuos (TR) que se generan en cada etapa.

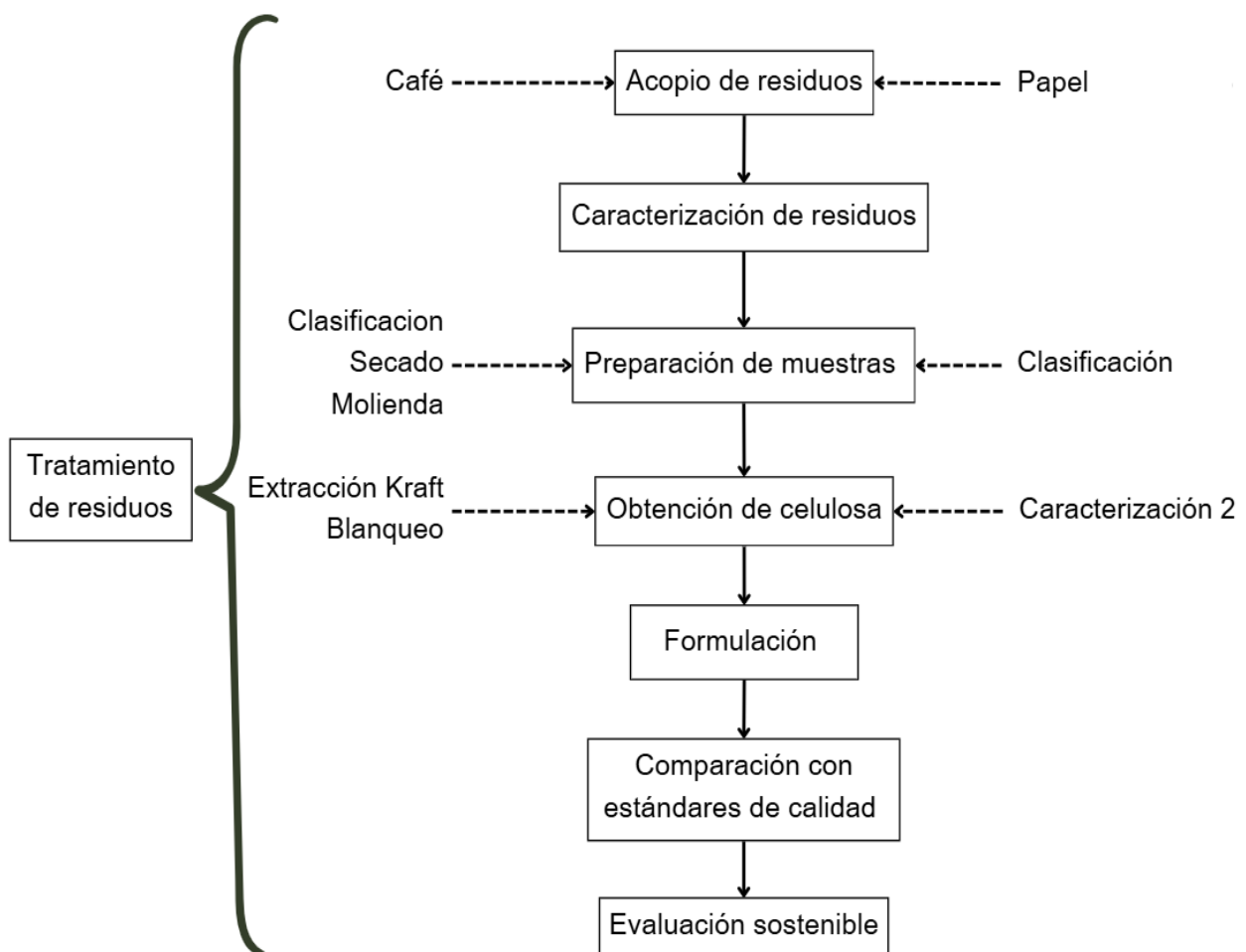


Figura 2.1 Diagrama de la metodología del proceso

2.1 ACOPIO DE RESIDUOS

Las materias primas para el desarrollo del proyecto fueron los residuos de café (borra, cascarilla y pulpa) y papel bond usado. Las fuentes generadoras de dichos residuos fueron empresas productoras y procesadoras de café y para el caso del papel usado, las oficinas, aulas y cubículos del Instituto tecnológico de Toluca.

2.1.1 Acopio de residuos de café

Dentro de los residuos generados por la industria cafetalera se consideró la borra, la pulpa y la cascarilla; donde la recolección de la borra de café fue de cafeteras domésticas.

Por otro lado, para los residuos de pulpa y cascarilla se estableció contacto con diversas fincas cafetaleras ubicadas en el Estado de México, para conocer la disponibilidad, volumen y frecuencia de generación de dichos residuos, así como promover estrategias de colaboración con los productores para su aprovechamiento sustentable.

2.1.2 Acopio de papel usado

La recolección de residuos de papel se realizó en lugares estratégicos dentro del Instituto Tecnológico de Toluca que se encuentra en Metepec, Estado de México, donde se solicitó donaciones del archivo sujeto a disposición y se fue personalmente a la recolección para garantizar que el papel se mezcle con otros tipos de residuos.

2.2 CARACTERIZACION DE RESIDUOS

Es necesario saber las condiciones iniciales de la materia prima con la que se va a trabajar para el desarrollo adecuado de su procesamiento y posterior interpretación de resultados, mismos que brindaran información para la evaluación y análisis de la eficiencia y calidad del proceso con respecto a la sustentabilidad.

Para las muestras de café y de pape bond que será dispuesto para el proceso propuesto, la caracterización consta de la determinación de humedad, cenizas, libre de extractivos y acidez; la metodología de aplicación de los procesos se establece en las normas TAPPI de la tabla 2.1, además de compuestos lignocelulósicos como la celulosa, alfa(α), beta(β) y gama (γ) celulosa, lignina y holocelulosa.

Tabla 2.1 Caracterización fisicoquímica y normas TAPPI de residuos de café

PARÁMETRO	MÉTODOS	CITAS
Humedad (%bh)	TAPPI T211 om-93	(TAPPI, 2000)
Cenizas (%bs)	TAPPI T211 om-93	(TAPPI, 2000)
Libres de extractivos (%)	ASTM D1105-56	(Colin et. al., 2008)
Celulosa (%)	Kurschner y Hoffer	(Magina et al., 2024)
Celulosa alfa(α), beta(β) y gama (γ)	TAPPI 203	(TAPPI, 2000)
Lignina en madera (%)	TAPPI T222 om-88	(TAPPI, 2000)
Holocelulosa (%)	Método Wise	(Wise et. al, 1946)
pH	TAPPI 509	(TAPPI, 2000)

Fuente: Technical Association of the Pulp and Paper Industries

Se complementa esta caracterización con técnicas de espectrofotometría infrarroja (FTIR), análisis térmicos como son el análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) en las que termobalanizas emiten termogramas que comparan la temperatura vs el peso de la muestra teniendo así que la tendencia de la gráfica indica el comportamiento de la muestra con los cambios de temperatura, además, se incorporó la microscopia electrónica de barrido que permite analizar la estructura de las muestras.

2.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

La preparación y el acondicionamiento de muestras para residuos de café y papel bond usado son procesos críticos que aseguran la calidad y la homogeneidad del material antes de su posterior procesamiento.

Debido a las condiciones específicas de cada muestra fueron tratadas de manera independiente como se describe a lo largo de este apartado.

Para el caso del papel usado como se consiguió de oficinas solo se quitaron impurezas visuales, se verifico que solo se encontraran muestras de papel tipo bond, se redujo a tamaño de partícula y se aseguró la humedad menor a 5% (TAPPI, 2000).

En el caso de los residuos de café, previo a la extracción Kraft, se redujo hasta un tamaño de malla No. 80, con la finalidad de facilitar el proceso de extracción; sin embargo, las características propias de cada residuo tabla (1.12) obligaron a brindarles diferentes tratamientos para facilitar la molienda, si bien todas las muestras contienen humedad, la cascarilla está lo suficientemente seca para poder molerla sin lavado y secado, solamente se realizó una inspección visual para evitar cuerpos ajenos a la matriz de interés.

2.3.1 Preparación de muestras de borra de café

Para la muestra de borra, fue necesario lavarla con agua potable para eliminar cafeína y compuestos aromáticos propios del grano (Tabla 1.12). El número de lavados se determinó por duplicado utilizando un espectrofotómetro, con el cual se realizaron lecturas al agua residual de los enjuagues hasta que las unidades de absorbancia (UA) tuvieron una variación menor a 0.3 o hasta que la diferencia de los últimos dos datos consecutivos sea menor del 0.01%. (MD, 2021)

Una vez realizados los lavados fue secada al sol para reducir su contenido de humedad hasta un valor menor de 15%; esto con la finalidad de poder ser molida hasta un tamaño necesario y evitar la proliferación de hongos en su almacenamiento. (Vega, 2004).

2.3.2 Preparación de muestras de pulpa de café

Para la muestra de pulpa de café, físicamente se percibe con una consistencia “chiclosa”, esto debido a su alto contenido de azúcares tabla 1.12, por ello fue necesario realizar lavados para eliminar este compuesto y facilitar la molienda, el número de lavados se determinó con el contenido de azúcares en el agua residual de cada enjuague, mismo que fue medido con un refractómetro, posteriormente se colocó al sol para eliminar humedad y molerlo.

2.4 OBTENCIÓN DE CELULOSA

Es la parte central del proceso, en el cual se hace la extracción de la celulosa de las fibras orgánicas como los residuos del café que es material virgen para la extracción de celulosa, así como de las hojas de papel bond usado para el reciclaje, de aquí la importancia de realizarlos de forma adecuada para la calidad del producto final (Lund, 2012).

2.4.1 Diseño de experimentos para extracción Kraft

Para la extracción Kraft, se planteó realizar pruebas para evaluar las variables que intervienen en el proceso, debido a los diferentes datos de operación encontrados (Tabla 1.2), por ello se propuso un diseño de experimentos considerando los factores que intervienen en el proceso, donde se estableció como constante a la presión, (presión atmosférica de Toluca, 1.0137 atm), el contenido de Na_2S fue de 0.5 gr para 100 g de muestra (Vega, 2004) y se varió la concentración de NaOH (7, 14 y 21%), el tiempo (1, 2 y 3 H) y la temperatura (40, 80 y 120 °C).

En la tabla 2.4 se muestran estas variables teniendo un total de 27 experimentos por muestra, considerando que son tres muestras que se analizan por duplicado, arroja un total de 162 experimentos, de estos se seleccionaron los parámetros en condiciones bajas, medias y altas de temperatura para cada % de concentración de NaOH para tener un total de 27 experimentos y al realizarlos por duplicado se realizaron 54 pruebas.

Todos los experimentos, después de la extracción Kraft fueron sometidos a blanqueo y secado, para realizar la determinación de celulosas y calcular los rendimientos, a esta información se le realizó un ANOVA para la selección de las mejores condiciones para la extracción de celulosa.

Se eligieron para cada concentración de NaOH tiempos y temperaturas de manera aleatoria buscando que no se repitieran, de tal suerte que solo quedaron nueve experimentos por residuo de café.

Tabla 2.2 Diseño de experimentos para residuos de café

Na ₂ S 0.5 g																										
Presión (atm)																										
7 % NaOH									14 % NaOH									21 % NaOH								
Tiempo (H)									Tiempo (H)									Tiempo (H)								
1			2			3			1			2			3			1			2			3		
T (°C)			T (°C)			T (°C)			T (°C)			T (°C)			T (°C)			T (°C)			T (°C)			T (°C)		
40	80	120	40	80	120	40	80	120	40	80	120	40	80	120	40	80	120	40	80	120	40	80	120	40	80	120

2.4.2 Digestión Kraft para residuos de café

Para este proceso se necesita un contenedor de presión que será cargado de residuos de café acondicionados, con licor blanco, que está compuesto por de sulfuro sódico (Na₂S), Hidróxido de sodio (NaOH) y agua (H₂O), posteriormente se lleva a calentamiento (Sewsynker-Sukai, David, & Gueguim Kana, 2020).

En este proceso se extrae la celulosa y elimina la lignina, se realiza una filtración para separar la celulosa recuperada de la lignina y el agua con los compuestos derivados de la digestión, (licor negro) en este punto en la celulosa, aún existe lignina, por esto aún tiene una coloración café por lo que se somete a un proceso de blanqueo con H₂O₂ al 30% con agitación constante para eliminar la lignina restante obteniendo celulosa blanqueada apta para el proceso de producción de papel (Vega, 2004).

2.4.3 Celulosa de papel reciclado

Teniendo que el papel ya es residuo y proviene de un proceso industrializado, ya no es necesario realizar un proceso de extracción, sino que hay que recuperar y reformar el papel, para ello se tiene que realizar un proceso de “Pulpeo” en el cual se coloca el papel usado triturado en un contenedor con agua, adicional se puede agregar H₂O₂ o hipoclorito de sodio (NaClO) con el objetivo de blanquear las fibras de papel (Gutiérrez, del Río, Martínez & Martínez, 2001).

Posterior al tratamiento de extracción de celulosa es conveniente realizar una caracterización de las pulpas obtenidas, con los parámetros necesarios para evaluar la

eficiencia de los procesos de extracción de celulosa comparando las condiciones iniciales con las finales de las fibras de celulosa para esto se recurre a las normas TAPPI, las cuales se presentan en la tabla 2.1.

2.5 FORMULACIÓN

Como método para determinar la mejor proporción en la mezcla de los residuos de la celulosa extraída de los residuos de café y papel reciclado se realizan muestras con diferentes porcentajes de cada una como se muestra en la tabla 2.5, para así comparar parámetros de calidad del papel y trabajar en aquel que tenga mejores índices de calidad.

Tabla 2.3 Formulación de papel reciclado

MUESTRA	CELULOSA DE CAFÉ (%)	FIBRAS DE PAPEL (%)
1	0	100
2	10	90
3	20	80
4	30	70
5	40	60
6	50	50
7	60	40
8	70	30
9	80	20
10	90	10
11	100	0

2.6 ESTÁNDARES DE CALIDAD

Para la evaluación de la calidad del papel obtenido, se tomó como referencia la norma PROY-NMX-AA-144-SCFI-2008, la cual establece los lineamientos para determinar las características físicas y mecánicas del papel reciclado o elaborado a partir de fibras alternativas.

Dicha norma, a su vez, hace referencia a diversos procedimientos de la Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), los cuales proporcionan métodos estandarizados para la medición de parámetros específicos.

En la NMX se señalan los principales indicadores de calidad que deben considerarse en la caracterización del papel, tales como el gramaje, espesor, resistencia a la tracción, al rasgado, a la explosión, entre otros.

Estos parámetros permiten evaluar el desempeño del material y su adecuación a los fines propuestos. En la tabla 2.6 se presentan los valores de referencia y los métodos aplicados conforme a dichas normas y se describe cada parámetro.

Tabla 2.4 Parámetros de calidad del papel

PARÁMETROS	UNIDADES	MÉTODOS DE PRUEBA (ENSAYO)	ESPECIFICACIONES		
			MÍNIMO	ESTÁNDAR	MÁXIMO
Calibre	M In	T-411om-02	34.4	39.3	-
Gramaje	g/m ²	T-410 om- 02	100	300	600
		NMX-N-001-SCFI-2011			
Porosidad	s	T-460 om-02	0.55	-	1.50
Humedad	%	T-412 om-02	3	5	7
		NMX-N-016-SCFI-2011			
Resistencia al estallido MULLEN	lb/in ²	TAPPI T403 y ISO 2758	29	-	36
Encolado	s	T-530 om-02	1	-	60

a) Calibre: Es el espesor o grosor físico de una hoja, se mide en micras (μm) o milímetros (mm) con un micrómetro universal DM, provisto de superficies de contacto planas y paralelas, que aplican una presión constante y controlada sobre la muestra, conforme a lo especificado en la norma TAPPI, a partir de la muestra de papel se seleccionan especímenes representativos, libres de pliegues, daños o contaminantes.

La muestra se coloca entre las superficies de medición del micrómetro, evitando zonas cercanas a los bordes. Una vez aplicada la presión, se registra el valor del espesor indicado por el instrumento. Se realizan múltiples mediciones en diferentes puntos del espécimen para evaluar la uniformidad del espesor y reducir la variabilidad del resultado

b) Gramaje: La determinación del gramaje del papel se realiza para evaluar la masa por unidad de área, parámetro fundamental para el control de calidad, ya que influye directamente en las propiedades mecánicas, ópticas y de uso final del papel (TAPPI,200).

Para el correcto funcionamiento se toma una muestra de papel, se recomienda trabajar en condiciones controladas (una atmósfera estándar de laboratorio a 23 ± 1 °C y 50 ± 2 % de humedad relativa) hasta alcanzar el equilibrio higroscópico.

A partir de la muestra se cortan rectángulos de área conocida, el corte debe realizarse de manera precisa, evitando bordes irregulares o deformaciones que puedan alterar el área real, se pesa individualmente en una balanza analítica. El gramaje se calcula como la relación entre la masa de la muestra y su área, se expresa en unidades de masa gramos por metro cuadrado (g/m^2), utilizando la ecuación 2.1

$$\text{Gramaje} = \frac{\text{Peso g}}{\text{Área m}^2} \dots\dots\dots \text{Ec. 2.1}$$

- c) Porosidad: Indica la permeabilidad al paso del aire a través de la estructura fibrosa, la cual está directamente relacionada con la formación, el grado de refinación de la pulpa, la compactación y el uso final del producto.

La medición se realiza utilizando un porosímetro tipo Gurley, el cual determina el tiempo requerido para que un volumen específico de aire atraviese el papel bajo una presión estándar. La muestra se coloca cuidadosamente en la cámara del instrumento, asegurando un sellado adecuado, se registra el tiempo necesario para que 100 mL de aire pasen a través del papel.

La porosidad del papel se expresa generalmente en segundos Gurley (s), los cuales representan el tiempo que tarda el volumen de aire establecido en atravesar la muestra. Valores altos indican menor porosidad (papel más cerrado), mientras que valores bajos corresponden a mayor porosidad.

- d) Humedad: Se seleccionan muestras del papel, libres de contaminación, pliegues o daños, se pesa en una balanza analítica, registrando su masa inicial antes del secado. El pesado debe realizarse rápidamente para minimizar el intercambio de humedad con el ambiente.

Posteriormente se colocan en una estufa de secado a una temperatura controlada, típicamente de 50 ± 2 °C, durante 24 horas, una vez concluido el secado, las muestras se enfrían en un desecador para evitar la reabsorción de humedad del ambiente. Pasado 30 minutos, se pesan nuevamente para obtener la masa seca, repetir el ciclo de secado y pesado hasta alcanzar masa constante, garantizando la completa eliminación de la humedad, se calcula con la ecuación 2.2.

$$\% \text{ Humedad} = \frac{(\text{Peso de la muestra húmeda} - \text{Peso de la muestra seca})}{\text{Peso de la muestra seca}} \times 100 \dots\dots\dots \text{Ec. 1.2}$$

- e) Resistencia al estallido: es la fuerza necesaria para perforar o romper el material, midiendo la presión que se ejerce sobre la muestra hasta que esta cede, indicando su capacidad para resistir golpes, impactos y presiones.

Para esta prueba se toma una muestra de papel, libres de defectos visibles como pliegues, perforaciones, arrugas o daños superficiales, se coloca entre los anillos de sujeción del equipo Mullen, asegurando un ajuste firme y uniforme para evitar deslizamientos o fugas de presión durante la prueba.

El equipo registra la presión máxima alcanzada en el momento del estallido, la cual corresponde a la resistencia al estallido del papel. Se realizan varias determinaciones en diferentes especímenes o zonas de la muestra para obtener un valor representativo del material.

La resistencia al estallido se expresa generalmente en kilopascales (kPa), conforme a la norma ISO 2758, o en libras por pulgada cuadrada (psi) según TAPPI T 403, indicando siempre la unidad utilizada. El resultado final corresponde al promedio aritmético de los valores obtenidos.

- f) Encolado: El grado de encolado del papel evalúa la resistencia de la hoja a la absorción de líquidos, particularmente agua o soluciones acuosas, propiedad directamente relacionada con el tipo y nivel de encolante utilizado en la fabricación del papel, este

parámetro se expresa en segundos (s). Para este parámetro se coloca una muestra de papel de 1 cm x 2.5 cm, se coloca en una bandeja de agua y se toma el tiempo que tarda en mojarse completamente.

2.7 EVALUACIÓN SOSTENIBLE

La evaluación de costo-beneficio del reciclaje del proceso de papel con residuos de café requirió un enfoque integral que considere los aspectos económicos, ambientales y sociales, por ello se realizó un análisis socioeconómico incluyendo una propuesta detallada de los costos de producción industrial y beneficios económicos a lo largo del tiempo para determinar la viabilidad financiera del proyecto de reciclaje.

Además, socialmente el proyecto influye en la comunidad, la creación de empleos, en la reducción de residuos, procesamiento y comercialización de los materiales reciclados, la mejora de la calidad de vida y el fortalecimiento de las relaciones comunitarias y promoviendo mayor conciencia ambiental.

En gestión de impacto ambiental, se realizó un análisis del ciclo de vida para identificar el impacto ambiental del proceso de reciclaje y proponer alternativas menos dañinas para el proceso, incluyendo aspectos como el uso de recursos, las emisiones y los residuos generados, así mismo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la descomposición de los residuos orgánicos.

2.8 TRATAMIENTO DE RESIDUOS

La identificación y el tratamiento adecuado de los residuos generados durante el proceso de producción es fundamental para garantizar la sostenibilidad ambiental del proceso y minimizar su impacto en el medio ambiente por esto se consideran los siguientes aspectos en gestión de emisiones.

- a) Residuos de papel no aptos para reciclaje: Durante la fase de clasificación y preparación de las muestras, se generaron residuos de papel que no fueron adecuados para el reciclaje ya que eran de otro tipo de papel o eran de color.
- b) Residuos de café: Dentro de las muestras de café que se recopilaban se encontraron filtros de papel, hojas y piedras, además parte de las muestras llegaron a presentar hongos y por ello ya no fueron aptos para el posterior tratamiento.
- c) Aguas residuales: Durante el proceso de producción en laboratorio se generaron aguas residuales provenientes tanto de los tratamientos a las matrices como de los lavados a estas mismas, contienen contaminantes como H_2O_2 y materia orgánica.

3. RESULTADOS

La presente sección expone y discute los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 2, con el propósito de responder al objetivo planteado en esta investigación.

3.1 ACOPIO DE RESIDUOS

El acopio de los residuos se llevó a cabo en diferentes líneas ya que son productos de diferentes fuentes generadoras, se fue directamente a los productores como se describe en este capítulo.

3.1.1 Acopio de residuos de café

Para el acopio de residuos de café, se consideraron 2 fuentes generadoras de acuerdo al tipo de residuos, para el caso de la borra de café, se solicitó el apoyo de compañeros que tienen un consumo regular de café y que cuentan con una cafetera en casa, para ello se les solicito que después de su preparación habitual, el contenido del papel filtro que regularmente se coloca en el bote de basura, se colocara en una bolsa de plástico para su recolección diaria y posterior almacenamiento en laboratorio hasta completar 30 kg figura 3.1.



Figura 3.1 Cafeteras domesticas

El dueño de la finca, el señor Federico Barrueta comentó que realiza dos ciclos de cultivo al año, en los cuales se cosechan aproximadamente 1500 kg del fruto del café, además comentó que trabaja con la especie arabica ya que maneja cafés de alta calidad, si bien no tiene datos de la cantidad de residuos que produce, menciona que los residuos orgánicos los somete a compostaje y facilitó 30 kilos tanto de cascarilla como de pulpa de café como se muestra en la Figura 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5



Figura 3.4 Plantas de Café



Figura 3.5 Residuos pulpa empaquetada

3.1.2 Acopio de papel usado

Para el acopio de papel usado se contactó con la persona responsable Sistema de Gestión Ambiental (SGA) del Instituto tecnológico de Toluca, al que se solicitó el material tipo bond sujeto a disposición, el cual se encontraba ya triturado, como se muestra en la figura 3.6.

Posteriormente se revisó manualmente para la eliminación de contaminantes externos, tales como grapas, clips, plásticos, diferentes tipos de papel o algún material diferente al papel bond y se almacenó en bolsas de plástico en el Laboratorio de Pruebas Piloto de Laboratorio de Investigación de Ingeniería Ambiental (LIIA) del Instituto Tecnológico de Toluca.



Figura 3.6 Recolección de muestras de papel usado

3.2 CARACTERIZACION DE RESIDUOS

La caracterización inicial de las muestras de residuos de café y de papel permitió obtener una serie de parámetros fisicoquímicos fundamentales para determinar la eficiencia de cada proceso, además de analizar los parámetros de calidad del papel que se busca y la posterior selección de estrategias de valorización.

3.2.1 Caracterización de lignocelulósicos

Los resultados presentados en la tabla 3.1 se les realizaron a las muestras de borra, cascarilla, pulpa y papel tal como se recibieron de los generadores, los parámetros incluyen propiedades como el contenido de humedad, cenizas, extractivos, lignina, celulosa y hemicelulosa, entre otros.

Tabla 3.1 Resultados Caracterización 1 de materias primas

PARÁMETRO	BORRA	CASCARILLA	PULPA	PAPEL
Humedad (%bh)	67.29 ± 1.34	6.30 ± 0.13	11.69 ± 0.58	1.51 ± 0.10
Cenizas (%bs)	5.43 ± 0.20	4.90 ± 0.30	17.53 ± 0.59	20.39 ± 0.11
L. extractivos (%)	25.66 ± 0.28	8.46 ± 0.03	10.29 ± 0.05	3.70 ± 0.09
Celulosa (%)	69.08 ± 1.00	77.33 ± 0.39	61.70 ± 3.18	97.65 ± 0.06
Alfa celulosa (%)	35.68 ± 0.94	19.82 ± 1.12	34.18 ± 1.08	85.51 ± 0.78
Beta celulosa (%)	61.32 ± 0.57	72.56 ± 1.20	62.70 ± 1.20	11.27 ± 0.94
Gama celulosa (%)	3.00 ± 0.37	7.62 ± 0.43	3.12 ± 0.22	0.87 ± 0.22
Lignina (%)	23.43 ± 0.72	19.70 ± 0.91	84.61 ± 3.00	1.23 ± 0.12
Holocelulosa (%)	67.35 ± 0.17	83.83 ± 0.85	81.77 ± 0.30	2.06 ± 0.08
pH	5.74 ± 0.02	4.58 ± 0.04	5.05 ± 0.04	8.52 ± 0.05

Los resultados de la tabla 3.1 otorga información del punto de partida de cada matriz de materia prima con la que se trabajó para poder comparar el rendimiento del proceso Kraft, y con ello la cantidad de celulosa obtenida para el papel.

En el caso del contenido de humedad, el más elevado se observó en la borra de café (67.29), lo que refleja su naturaleza fresca y altamente acuosa debido al proceso de lixiviación durante la preparación de café. Este parámetro es crítico, ya que influye directamente en los requerimientos energéticos para el secado previo a cualquier tratamiento químico o térmico. En contraste, el papel presentó la menor humedad (1.51%), lo que favorece su posterior tratamiento y su almacenaje.

Los valores más altos de cenizas se registraron en el papel (20.39%) y en la pulpa (17.53%), lo que sugiere una mayor presencia de compuestos inorgánicos lo que indica un contenido mineral considerable (Fierro, 2018). Este aspecto puede limitar su uso en aplicaciones donde se requiere alta pureza orgánica.

En el caso del porcentaje de extractivos, la borra mostró el mayor contenido (25.66 %), lo que indica una alta concentración de compuestos solubles como lípidos, polifenoles y azúcares, principalmente la cafeína.

El contenido de celulosa total se presentó en el papel (97.65%), lo que confirma su naturaleza altamente purificada y libre de lignina debido al proceso industrial previo a su uso, la cascarilla también presentó un contenido significativo (77.33%), superior en comparación a la borra (69.08%) y la pulpa (61.70%).

Estos resultados sugieren que, a pesar de ser un subproducto agrícola, la cascarilla posee un potencial celulósico comparable al de fuentes maderables utilizados para la industria papelería, que es de 40 a 70% como reporta Villa (2006).

La alfa celulosa representa la fracción más resistente, cristalina y de mayor peso molecular, misma que es resistente a los procesos de extracción, es la más valorada en la industria papelería, los resultados indican que el papel (85.51%), tiene un mayor contenido de alfa celulosa, esto debido a que ya es papel producido, por otro lado los residuos del café, la borra y la pulpa presentaron valores similares (35.68% y 34.18%), lo que indica una fracción útil para su uso en la producción de papel.

Para el caso de beta celulosa corresponde a cadenas de menor peso molecular y menor cristalinidad, por ello se vuelven degradables en soluciones alcalinas diluidas (Abolore et al., 2024), en este caso la cascarilla presentó el mayor contenido de beta celulosa (72.56%) y la pulpa y la borra también mostraron valores elevados (62.70% y 61.32%). El papel en cambio tuvo un contenido muy bajo (11.27%) debido a las características propias del residuo.

La gamma celulosa representó compuestos solubles de bajo peso molecular, como hemicelulosas y residuos de hidrólisis parcial, en el caso de las matrices utilizadas, los residuos de la industria cafetalera mostraron un mayor contenido teniendo que en la cascarilla (7.62%), la borra y la pulpa presentaron valores similares (3.00% y 3.12%),

mientras que el papel tuvo el menor contenido ($0.87 \pm 0.22 \%$), lo que refuerza su perfil purificado.

El contenido de lignina en las matrices, la pulpa presentó contenido alto de lignina (84.61%), lo que limita su uso directo en la producción del papel debido a que es un contaminante que deteriora las características propias de este, como la coloración y resistencia (Sánchez-Monedero et al., 2025). En contraste, el papel mostró un contenido mínimo (1.23%), lo que refuerza su idoneidad para su reciclaje.

La cascarilla y la pulpa presentaron altos valores de holocelulosa (83.83% y 81.77 %), lo que indica una buena proporción de polisacáridos estructurales, además el pH de los materiales varió significativamente, siendo en borra (5.74), cascarilla (4.58) y pulpa (5.05), mientras que el papel presentó un pH alcalino (8.52) debido al proceso previo de producción, esta diferencia puede influir en la estabilidad de los compuestos durante el almacenamiento y en la eficiencia de los procesos químicos posteriores, como la deslignificación alcalina.

3.2.2 Análisis por FTIR

Además, se aplicó el análisis FTIR en los tres tipos de residuos de café como se describe en los siguientes diagramas figura 3.7, 3.8 y 3.9.

a) Borra: El equipo arrojó datos para formar el espectro de la borra de café de la figura 3.7 en la cual se identifican 7 bandas importantes que se describen posteriormente.

La banda 1 que se muestra en la figura 5 se encuentra alrededor de los 3200 cm^{-1} que representa la vibración de los grupos hidroxilo debido a la humedad en la borra, así como una vibración de OH en estructuras fenólicas y alifáticas.

La banda 2 y 3 son dos picos de absorción que aparecen a 2900 cm^{-1} (pico 2) y a 2850 cm^{-1} (Pico 3) se atribuyen a la vibración de estiramiento de C-H en el grupo metoxilo aromático y los grupos metilo y metileno.

La banda 4 que se encuentra alrededor de 1730 cm^{-1} se asigna al grupo carbonilo, que indica la presencia de vibración en el enlace $\text{C}=\text{O}$ que corresponde esencialmente a los grupos éster de la hemicelulosa y los ácidos p -cumárico de la lignina y/o hemicelulosa.

La banda 5 que se encuentra entre 1400 y 2000 cm^{-1} muestran la naturaleza aromática debido a los enlaces $\text{C}=\text{C}$ en el anillo aromático.

La banda 6 indica la presencia de vibraciones del enlace $\text{C}-\text{O}$ se detectan alrededor de 1100 cm^{-1} .

La banda 7 que es el pico en la región de 820 cm^{-1} se asigna a la vibración de flexión $\text{C}-\text{H}$ también se atribuyen a las vibraciones $\text{C}-\text{N}$ de los grupos amina (MD, 2021).

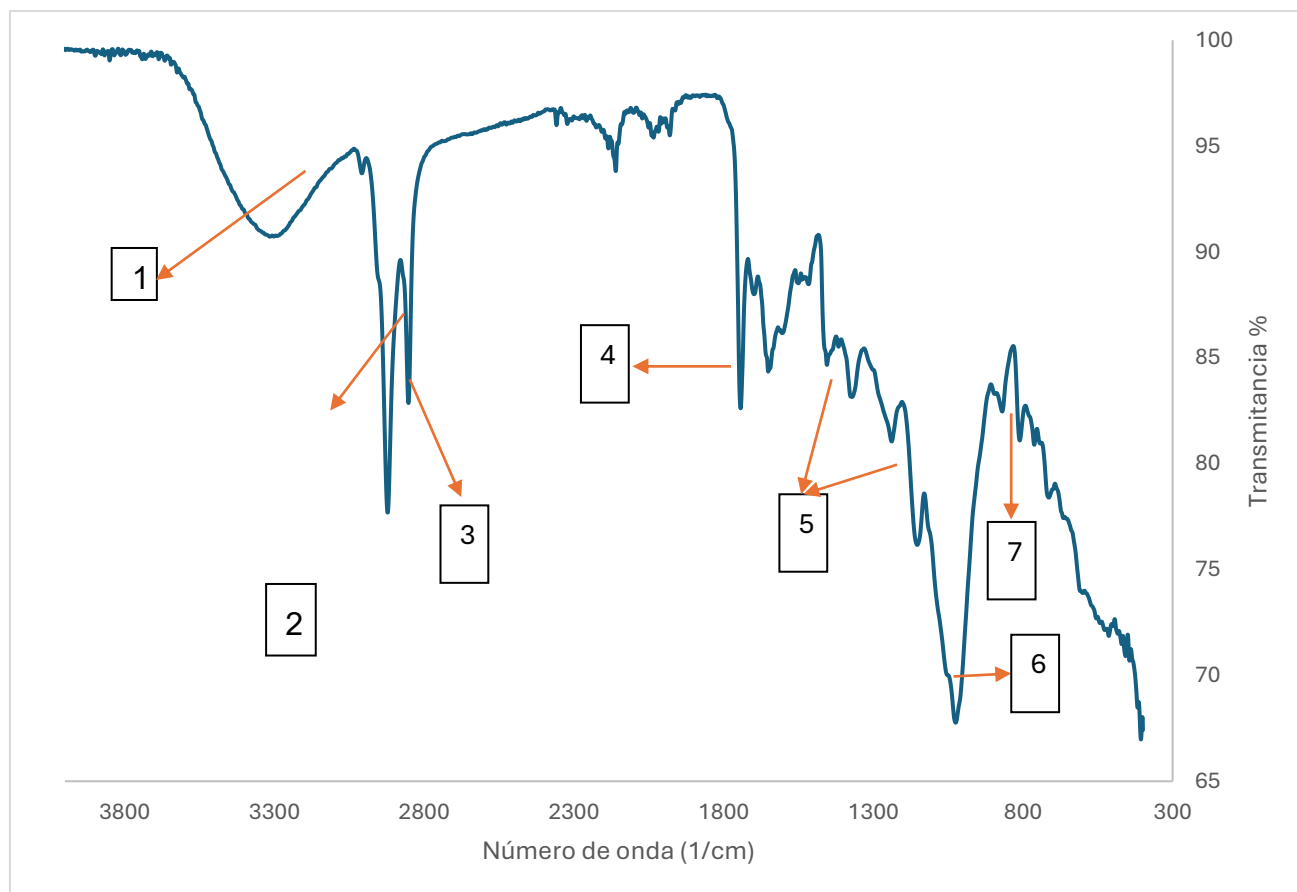


Figura 3.7 Espectro IR de borra de café

b) Cascarilla y pulpa: Los espectros de la pulpa y la cascarilla presentan una distribución similar al espectro de la borra como se ilustra en la figura 3.8 y 3.9, identificando los mismos picos debido a la misma naturaleza de la muestra y el fundamento de la técnica ya que solo interactúa con los tipos de enlaces y las muestras presentan contenidos similares.

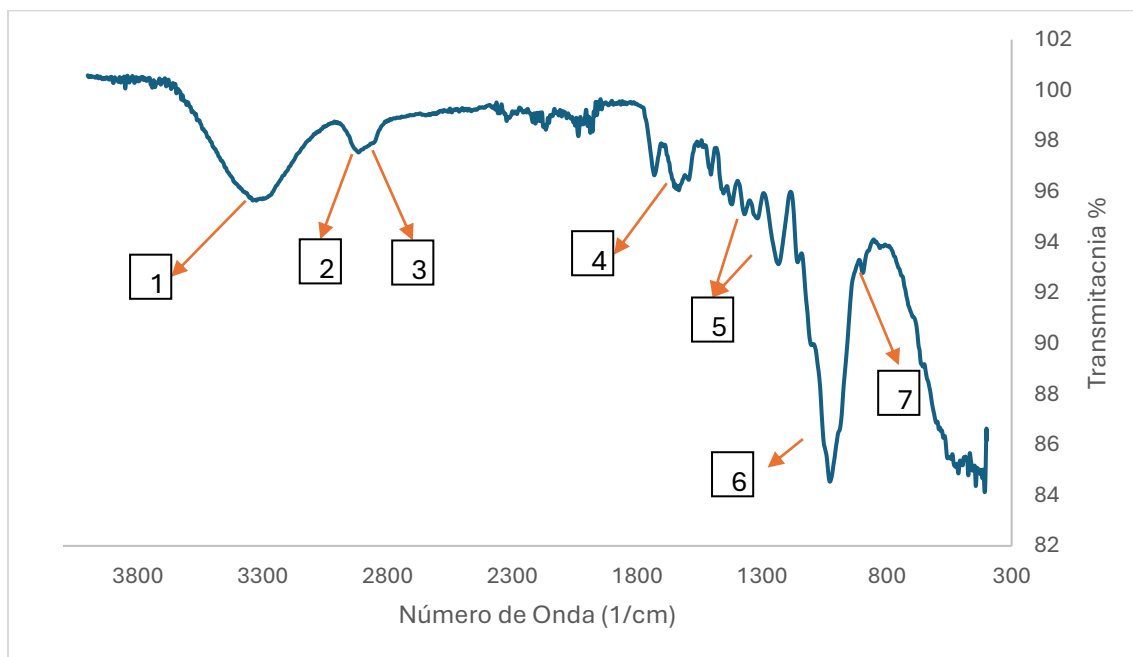


Figura 3.8 Espectro IR de cascarilla de café

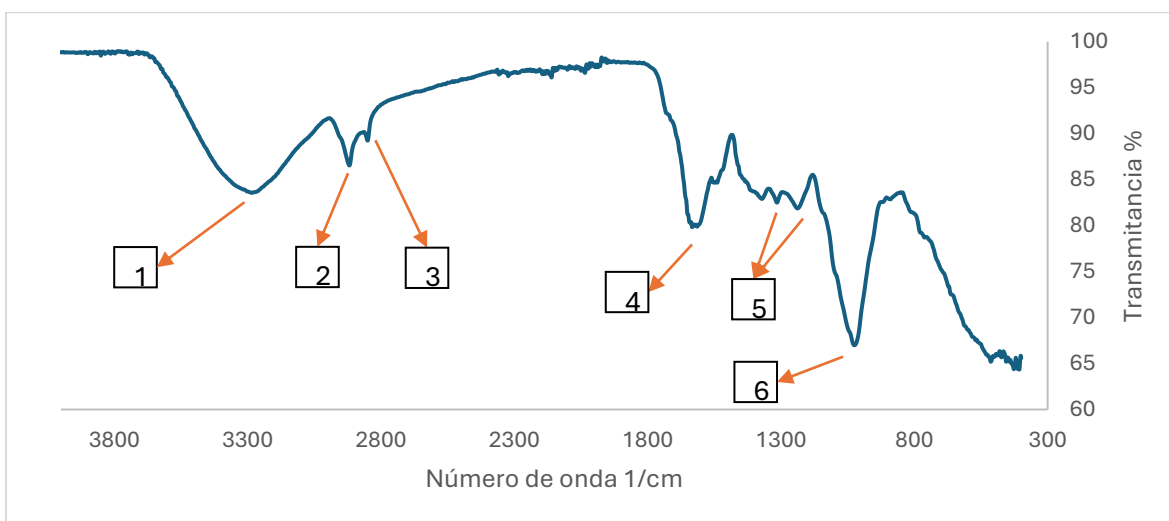


Figura 3.9 Espectro IR de pulpa de café

3.2.3 Análisis termogravimétrico (TGA)

En el análisis termogravimétrico se registra la pérdida de peso de una muestra en la medida en que se incrementa de la temperatura ambiente, hasta temperaturas de 1000°C, las diferentes biomásas vegetales se caracterizan por su diversidad en cuanto a contenido de celulosa, hemicelulosa, lignina y componentes extractables como terpenos, taninos, ácidos grasos, aceites y resinas; humedad y materia mineral.

El equipo que se utilizó para el análisis es el TGA550 marca Discovery se muestra en la figura 3.10, todas las muestras fueron tratadas bajo las mismas condiciones de operación como la velocidad de aumento de la temperatura de 10 °C/min con un rango de temperatura ambiente a 800°C.



Figura 3.10 Equipo TGA550 marca Discovery

- a) La muestra de borra se analiza en el equipo mencionado en el cual se coloca 3.013 mg de muestra y partiendo de temperatura ambiente se calienta de manera controlada hasta los 800 °C. de aquí el equipo emite datos con los que se grafican los resultados y se emite el diagrama de la figura 3.11.

En el termograma de borra de café se observa una ligera pérdida de peso de la temperatura ambiente a los 275°C el cual es debido a la humedad que aún tiene la muestra y compuestos volátiles como el CO y CO₂ (Mei, 2016).

A partir de ahí se muestra una bajada abrupta de peso (del 95% hasta el 40%) alrededor de los 420 °C, donde tiene lugar la descomposición de celulosa y hemicelulosa; y una tercera etapa de menor pérdida de masa, a temperatura por encima de 580 °C, donde ocurre básicamente la descomposición de la lignina hasta su reducción a cenizas (Manals,2011).

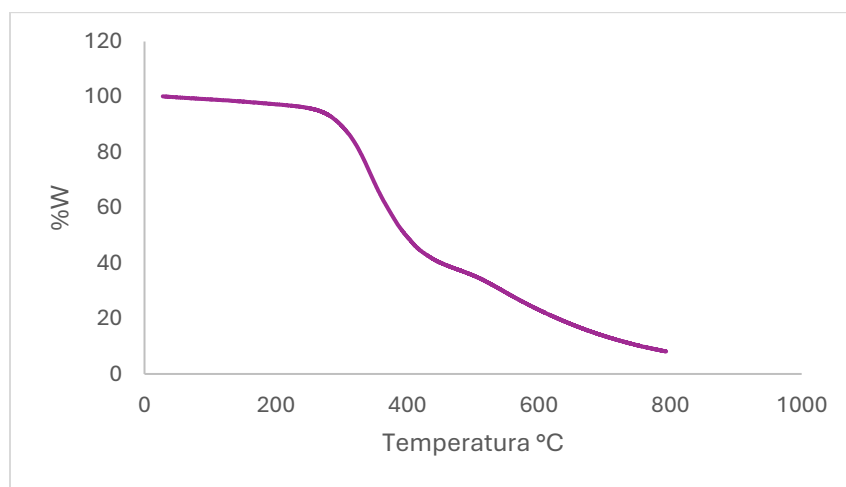


Figura 3.11 TGA de borra de café

- b) La muestra de cascarilla de café se coloca 2.33 mg de muestra y partiendo de temperatura ambiente se calienta de manera controlada hasta los 800 °C. de aquí el equipo emite datos de la figura 3.12.

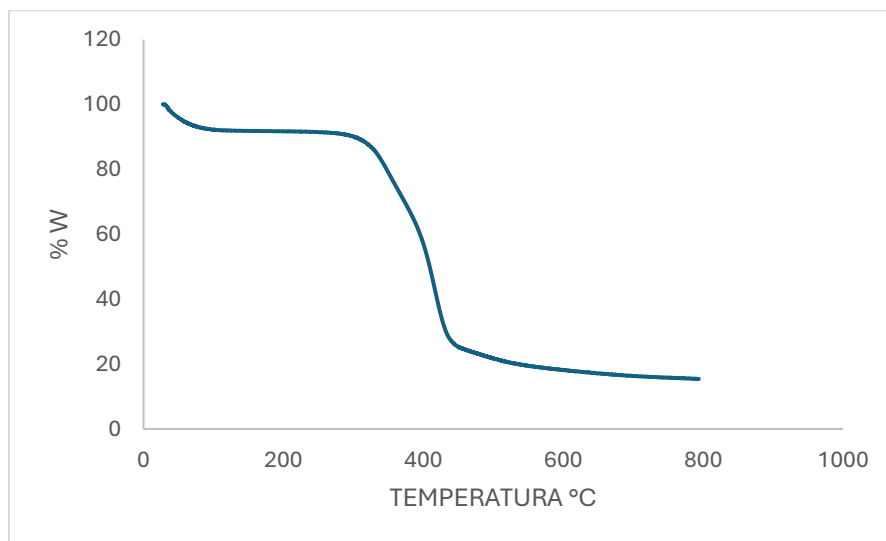


Figura 3.12 TGA de cascarilla de café.

Del termograma de la cascarilla de café, se observa la primera caída se encuentra entre la temperatura ambiente y los 100°C que corresponde a una pérdida de humedad, seguidamente y como consecuencia de un proceso de pirolisis que ocurre entre los 300°C y 450°C se liberan productos volátiles como CO₂, CO, CH₄, H₂ y SO₂, finalmente la reacción concluye después de que el 70% del peso de la muestra se transforman en gases y lo que queda corresponde a carbón fijo y cenizas (Rodríguez, 2009).

- c) En el caso de la muestra de pulpa de café se colocan 4.228 mg de muestra y partiendo de temperatura ambiente se calienta de manera controlada hasta los 800°C. de aquí el equipo emite datos con los que se grafican los resultados y obtenemos el diagrama de la figura 3.13.

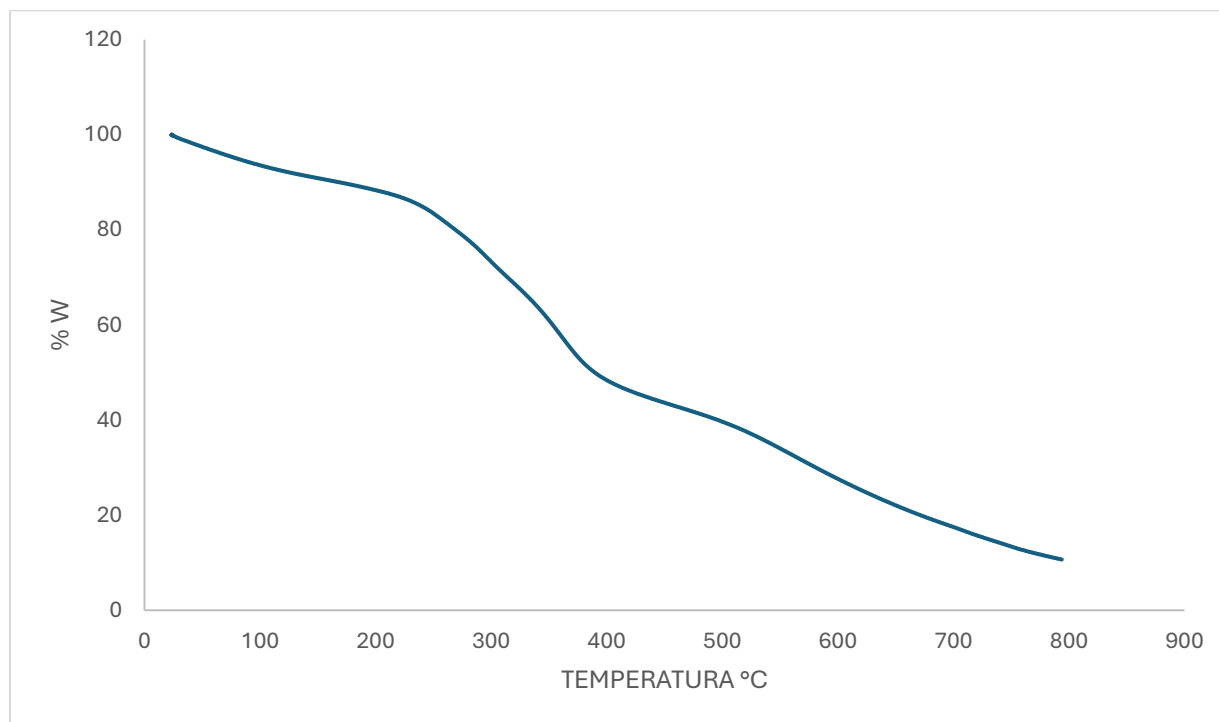


Figura 3.13 TGA de pulpa de café

Para la muestra de pulpa de café al inicio del aumento de temperatura se pierde un porcentaje que sería la humedad, luego se presenta una pérdida de masa mayor y de gran magnitud entre los 200°C y 500°C que evidencia la perdida de material volátil finalmente el porcentaje de masa residual que no varía al aumentar la temperatura luego de la perdida de material volátil corresponde al porcentaje de cenizas (Durán, 2011).

3.2.4 Análisis de entalpía de descomposición (DSC)

El equipo que se utiliza para el análisis es el DSC250 se muestra en la figura 3.14, todas las muestras fueron tratadas bajo las mismas condiciones de operación.

El equipo emite datos y termo gramas con rampas, en cada una de estas se selecciona la primera rampa para para homogeneizar el estudio y se hacen los ajustes en los ejes verticales para observar cada transición.



Figura 3.14 Equipo DSC250

a) La muestra de borra se analiza en el equipo mencionado en el cual se coloca 1.39 mg de muestra y partiendo de temperatura ambiente se enfría hasta -50°C y luego se calienta hasta 400°C , el comportamiento de esta muestra se observa en la figura 3.15.

La mayor entalpía calórica se alcanzó en la temperatura 375°C lo que indica que se puede utilizar como biocombustible, de acuerdo con las transiciones observamos un proceso exotérmico y un pico de fusión de la fase cristalina, lo que se traduce como una recristalización alrededor de los 400°C y continua con su proceso de degradación (Pabon, 2016).

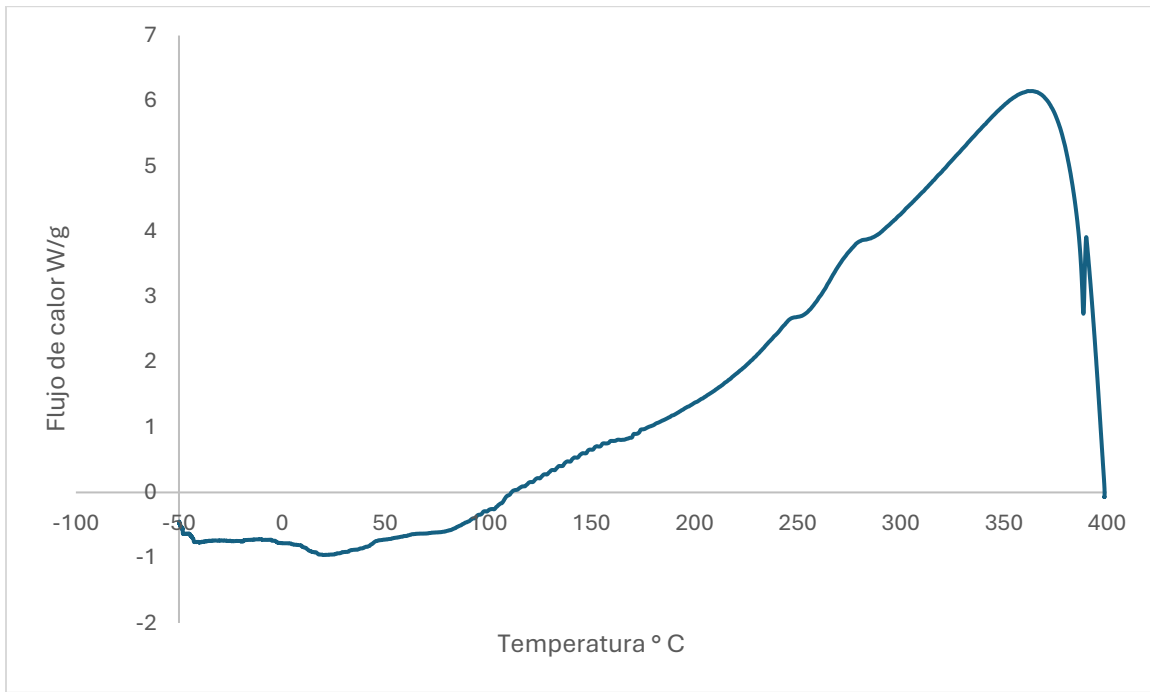


Figura 3.15 Termograma de borra de café

b) La muestra de cascarilla de café se analizó en el equipo mencionado en el cual se coloca 2.33 mg de muestra y partiendo de temperatura ambiente se enfría hasta los -50°C y luego se calienta hasta los 400°C , el comportamiento de esta muestra se observa en la figura 3.16.

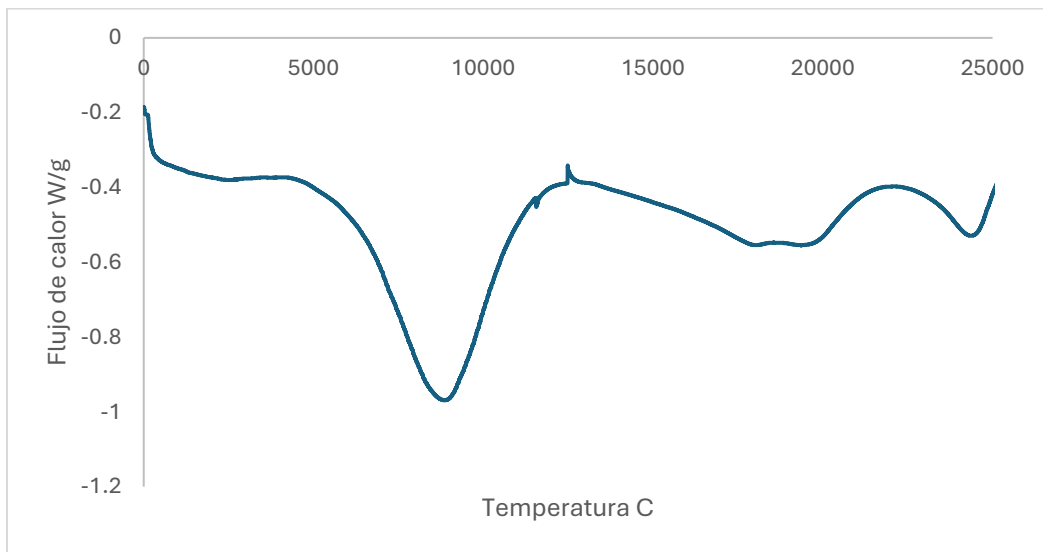


Figura 3.16 Termograma de cascarilla de café

De acuerdo con las transiciones se observó un proceso endotérmico, al inicio existe la deflexión inicial proporcional a la capacidad calorífica de la muestra justo en seguida alrededor de los -25°C se observa la parte de la curva sin efectos térmicos que sería la línea base, a continuación se tiene una transición vítrea de la fase amorfa alrededor de los 100°C , además de un pico de cristalización a los 160°C y un pico de fusión de la fase cristalina alrededor de los 360°C y aquí comienza la degradación lo que se traduce como una recrystalización alrededor de los 350°C hasta los 400°C (Gill,2010).

- c) La muestra de pulpa de café se analizó en el equipo mencionado en el cual se colocó 1.509 mg de muestra y partiendo de temperatura ambiente se enfría hasta los -50°C y luego se calienta hasta los 400°C , el comportamiento de esta muestra se observa en la figura 3.17.

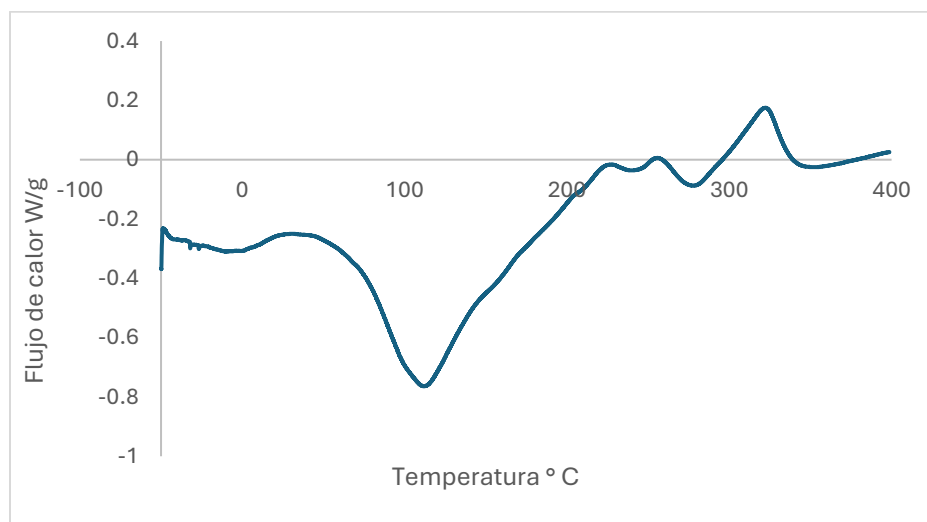


Figura 3.17 Termograma de pulpa de café

De acuerdo con las transiciones se observó un proceso endotérmico, en este caso al inicio existe la deflexión inicial proporcional a la capacidad calorífica de la muestra justo en seguida alrededor de los -50°C a los 0°C , a continuación, se tiene una transición vítrea de la fase amorfa alrededor de los 100°C , además de un pico de cristalización a los 350°C y aquí comienza la degradación lo que se traduce como una recrystalización alrededor de los 350°C hasta los 400°C .

3.2.5 Análisis por microscopio electrónico de barrido

Inicialmente en un porta muestras se colocaron las muestras de interés adheridas con cinta de cobre para poder ser analizadas con el microscopio electrónico de barrido como se muestra en la figura 3.18.

El equipo utilizado para la práctica fue el microscopio electrónico de barrido JSM-6610LV marca JEOL que cuenta con un detector de rayos X modelo 51-ADD0013 marca Oxford como se muestra en la figura 3.19, para el cual previa mente las muestras fueron sometidas a un baño de átomos de oro con el equipo DENTON VACUUM (Figura 3.20) durante 30 segundos y con un voltaje de 30 volts

Esto con la finalidad de mejorar la calidad de las imágenes, una vez iniciado el análisis se tomaron fotografías con un aumento de 500, 1000, 1500 y 2000 para cada una de las muestras, enfocándose en áreas de interés específicas para la caracterización.



Figura 3.18 Porta muestras con muestras



Figura 3.19 Microscopio electrónico de barrido

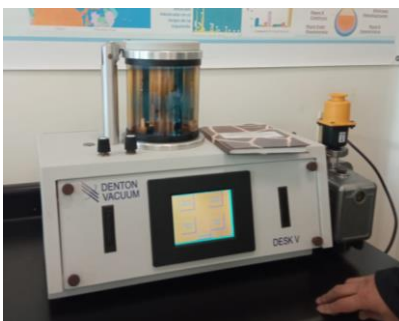


Figura 3.20 Baño de átomos de oro

El equipo tomó micrografías que son fotografías de los aumentos en las que muestran las estructuras que se analizan, además de una prueba EDS (Espectroscopia de Dispersión de Energía), técnica que identifica y cuantifica la composición elemental de una muestra.

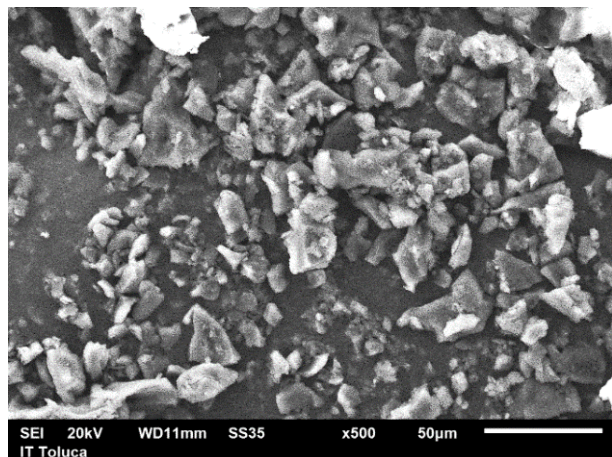


Figura 3.21 SEM x500 borra de café

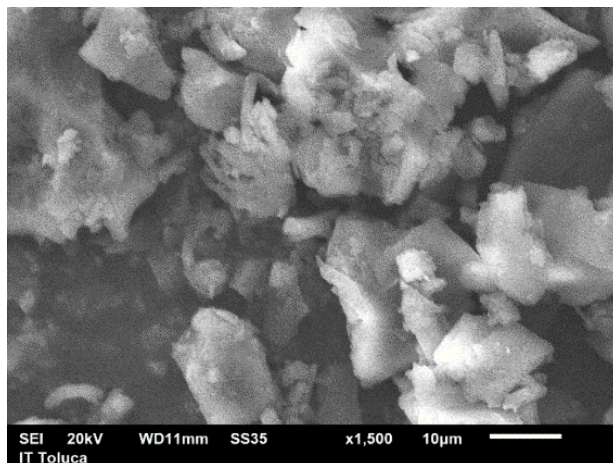


Figura 3.23 SEM x1500 borra de café

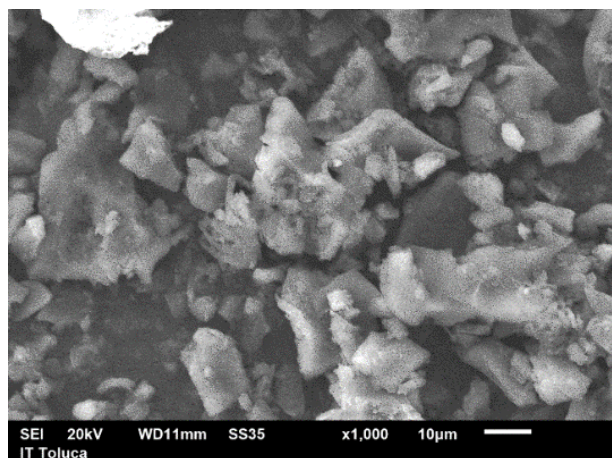


Figura 3.22 SEM x1000 borra de café

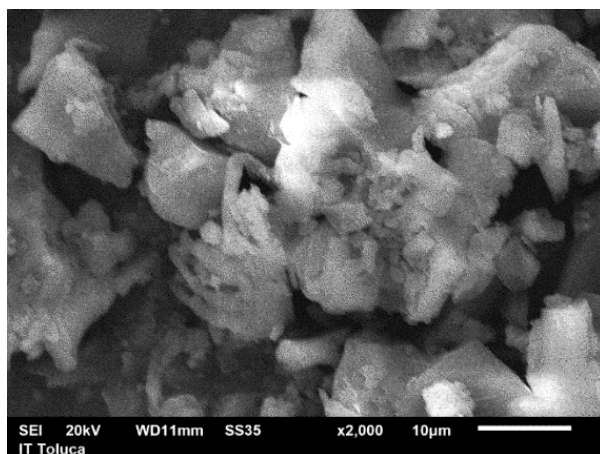


Figura 3.24 SEM x2000 borra de café

En las muestras de borra (Figura 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24) se observan partículas de diferentes tamaños con tendencia a formar rectángulos, como granos de azúcar con textura grumosa, no se distingue si contiene poros y para el caso de la prueba EDS presenta existencia de átomos como el Mg, P, K, Ca, además de los C y O característicos de materia orgánica.

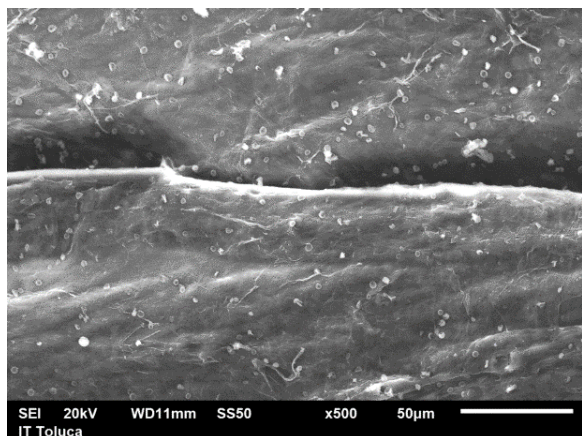


Figura 3.25 SEM x500 cascarilla de café

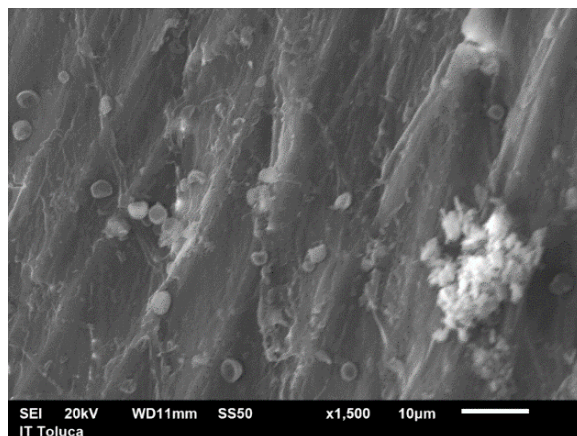


Figura 3.27 SEM x1500 cascarilla de café

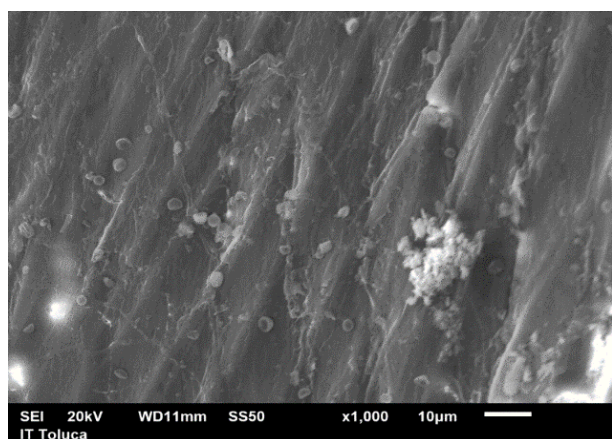


Figura 3.26 SEM x1000 cascarilla de café

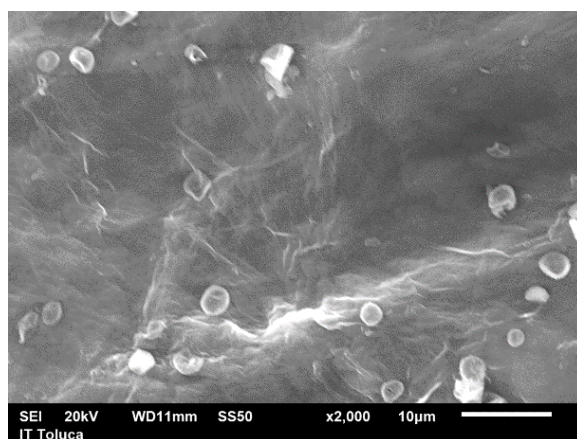


Figura 3.28 SEM x2000 cascarilla de café

Para el caso de las muestras de cascarilla de café (Figura 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28) se observan texturas similares a las de una hoja de papel, ya que se ve lisa, escamosa, simétrica que tiene acumulaciones de otras partículas que asemejan un arbusto, estas se aprecian de forma esférica irregular, con algunos pliegues y con partículas finas redondeadas semejantes a lentejas distribuidas de manera aleatoria heterogénea, estas se encuentran distribuidas de manera uniforme y aleatoria sobre la textura lisa.

A esta última micrografía de x2000 (figura 3.28) se le realizaron pruebas EDS teniendo así que los componentes principales son el carbono y el oxígeno, lo que es consistente con el tipo de muestras que se analizan, debido a su naturaleza orgánica.

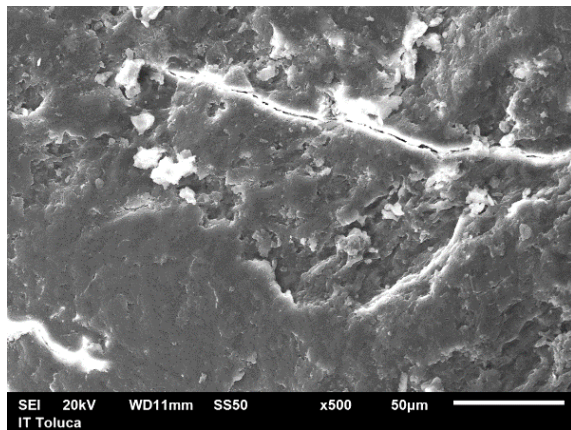


Figura 3.29 SEM x500 de pulpa de café

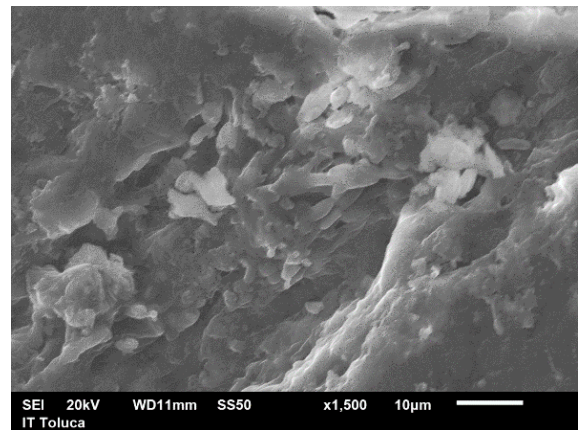


Figura 3.31 SEM x1500 de pulpa de café

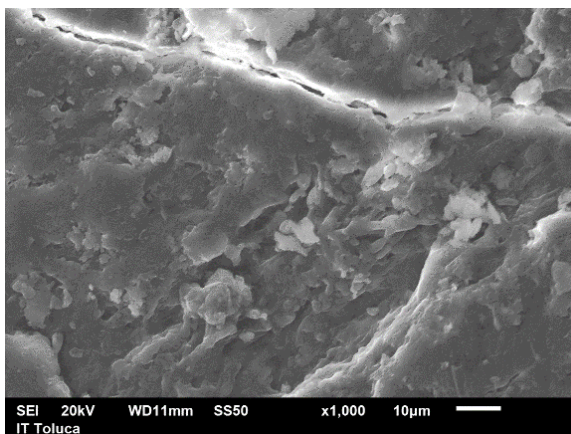


Figura 3.30 SEM x1000 de pulpa de café

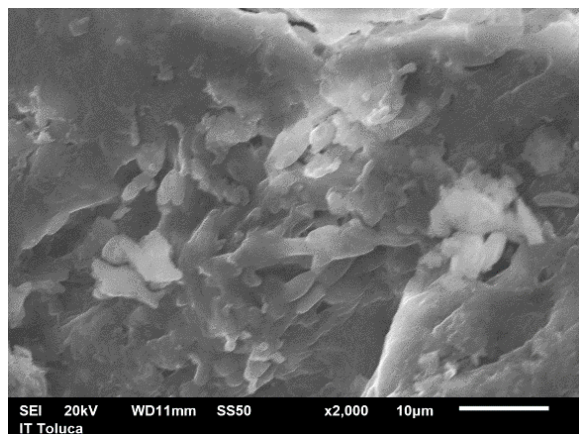


Figura 3.32 SEM x2000 de pulpa de café

Para el caso de la pulpa de café (Figura 3.29, 3.30, 3.31 y 3.32) se observan imágenes escamosas de diferentes tamaños similares a hojuelas de maíz distribuidas de forma aleatoria, en este caso se pueden observar varios huecos y profundidades lo que sugiere un material más poroso.

Para el caso de la prueba EDS hace presencia elementos como P, K, Ca, además del carbono y del oxígeno, lo que sugiere contacto con el suelo o algún contaminante en su traslado, o restos de fertilizantes.

3.3 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

En la preparación previa a la extracción Kraft se realizaron adecuaciones a cada muestra según las necesidades y características de cada una de ellas para llevarlas a molienda.

Las condiciones propias de la cascarilla de café permitieron su molienda sin la necesidad de un lavado previo (Figura 3.33), tampoco fue requerido un proceso de secado, teniendo que las condiciones en que fue recopilada son aptas para su reducción de tamaño.



Figura 3.33 Cascarilla de café

Para el caso de las muestras de papel fueron preparadas mediante una selección preliminar cuyo propósito fue evitar la presencia de elementos que pudieran interferir en las etapas posteriores. Dado que el papel utilizado provino de un acopio donde ya se encontraba triturado, la preparación se limitó a la remoción manual de materiales ajenos al papel bond, tales como clips, grapas, cintas adhesivas, plásticos u otros componentes no celulósicos.

3.3.1 Preparación de muestras de borra de Café

Para la borra de café, requirió lavados debido a la coloración que esta produce, donde para determinar la cantidad de lavados se realizaron pruebas de laboratorio en relación 1:1 y 1:2 de una muestra compuesta de todos los lugares donde se hizo el acopio de la muestra, y una segunda de una sola cafetera de una oficina.

Lo anterior se realizó por duplicado en un VPP donde se mantuvo con agitación constante durante 1 minuto y se filtró para recuperar el líquido, este se colocó en celdas y se leyó en el espectrofotómetro (figura 3.34) a una longitud de onda de 620 nm de absorbancia.



Figura 3.34 Espectrofotómetro del laboratorio LIIA

De acuerdo con estos resultados (Anexo B) se determinó que son necesarios al menos 4 lavados en relación 1:1, para poder ser utilizado y genere menos interferencias por coloración como se ve en las figuras 3.35, 3.36, 3.37 y 3.38 donde se graficaron las absorbancias obtenidas contra el número de lavados.

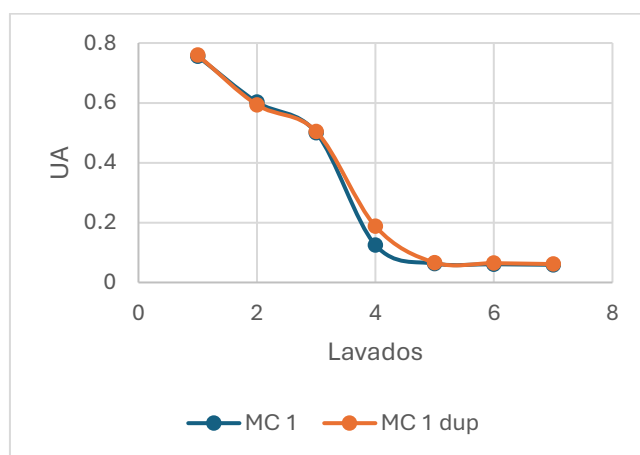


Figura 3.35 lavados de muestra compuesta relación 1:1

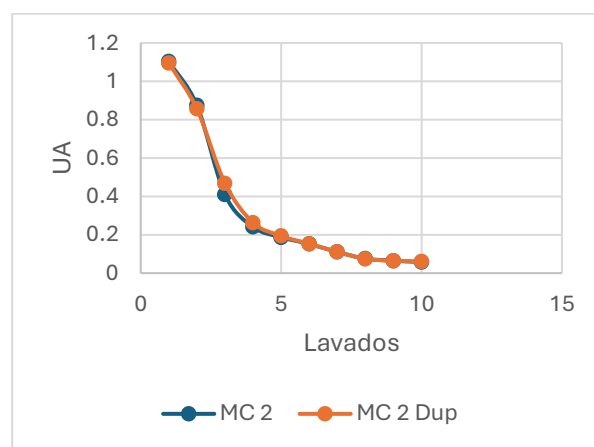


Figura 3.36 lavados de muestra compuesta relación 1:2

Una vez determinado el numero optimo de lavados para la borra de café, se lavó 4 veces una muestra de 7 kg en relación 1:1. Posteriormente se dejó secar a condiciones

ambientales durante 24 horas, para reducirlo de tamaño en un molino Marca IKA ® MF basic (figura 3.38) con un tamaño de partícula de 0.177 mm (Tamiz No.80).

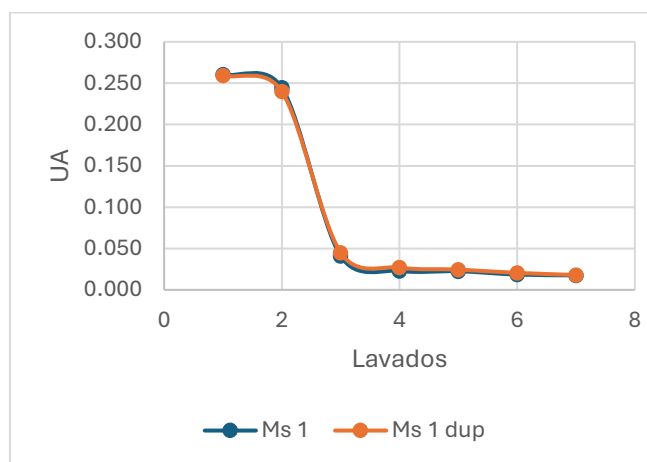


Figura 3.37 Lavados de muestra simple relación 1:1

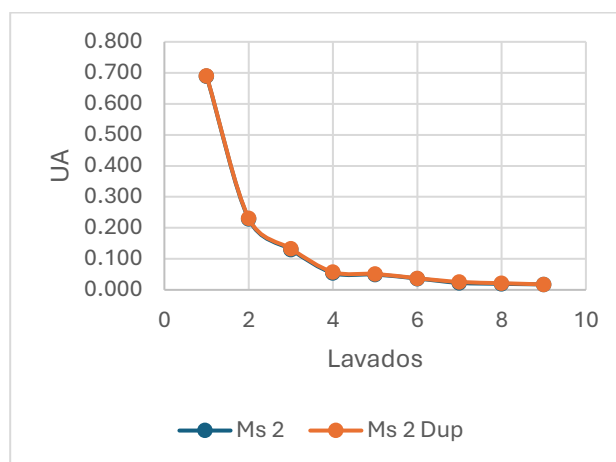


Figura 3.38 Lavados de muestra simple relación 1:2

3.3.2 Preparación de muestras de pulpa de café

En las muestras de pulpa, fue necesario realizar lavados con el fin eliminar azúcares, evitando así la caramelización en el molino y facilitando su reducción de tamaño, por ello, se realizaron pruebas de laboratorio para lavado óptimo.



Figura 3.39 Molino Marca IKA ® MF basic

Se realizó la determinación de °Brix en el agua residual de los lavados, en una relación 1:2 en un VPP, obteniendo que son necesarios al menos 4 lavados como se ilustra en la figura 3.40 observando la reducción del contenido de azúcares en esta muestra, para posteriormente secarla al ambiente durante 24 horas y poder facilitar su proceso de molienda. Para la molienda y tamizado, se utilizó un molino de marca IKA® MF basic hasta un tamaño de partícula de tamiz N. 80 Figura 3.39.

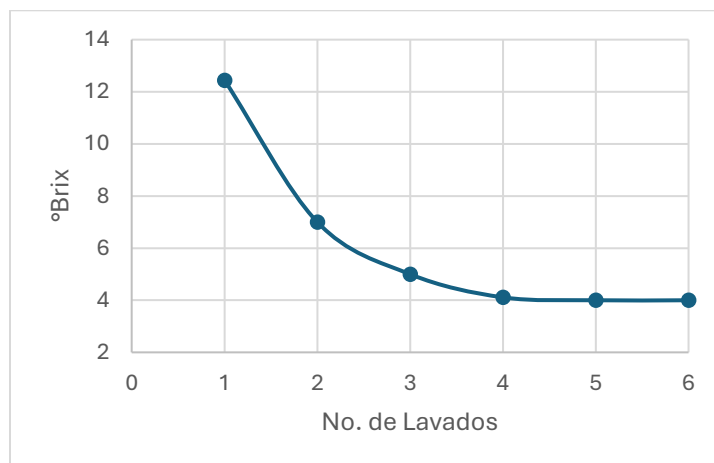


Figura 3.40 Lavados para eliminación de azúcares

3.4 OBTENCIÓN DE CELULOSA

Del diseño de experimentos mencionado en el capítulo 2 se realizaron las pruebas Kraft, después se le realizaron los lavados y el blanqueo (figura 3.41) para realizar la segunda caracterización donde se analiza el contenido de alfa celulosa, beta celulosa, gamma celulosa y lignina ya que son los parámetros que se ven involucrados para la formación de hojas de papel y se compararon con los valores iniciales que se expusieron en la tabla 3.1.



Figura 3.41 Muestras blanqueadas de borra de café

3.4.1 Diseño de experimentos para extracción kraft

A la extracción de la alfa celulosa que se utilizó para el papel, se le realizó una nueva caracterización con alfa, beta y gamma celulosa para calcular el rendimiento.

- a) Pruebas Kraft borra de café: La caracterización de la borra de café se realizó después del blanqueo y secado de cada uno de los experimentos y se registraron los valores de los parámetros analizados en la tabla 3.2.

Se determinó que la alfa celulosa se incrementó significativamente alcanzando hasta 63.92%, lo que indica una purificación efectiva, para la beta celulosa disminuyó en la mayoría de los tratamientos, lo que sugiere conversión o remoción de componentes amorfos, además la gamma celulosa tiende a aumentar en algunos casos, posiblemente por la degradación parcial de cadenas cortas o solubilización de hemicelulosas.

Tabla 3.2 Caracterización de experimentos de borra

CONDICIONES KRAFT			ALFA CEL (%)	BETA CEL (%)	GAMMA CEL (%)	LIGNINA (%)	REND (%)
[%] NAOH	T (H)	TEMP. (°C)					
7	1	40	55.86 ± 0.26	29.53 ± 0.26	14.61 ± 0.00	13.66 ± 0.02	52.82%
	2	80	60.92 ± 0.00	20.16 ± 0.26	18.92 ± 0.26	7.09 ± 0.85	66.66%
	3	120	63.92 ± 0.53	24.09 ± 0.53	11.99 ± 0.00	5.20 ± 0.03	74.86%
14	1	40	55.30 ± 0.53	20.16 ± 0.26	24.54 ± 0.26	8.03 ± 0.07	51.29%
	2	80	62.98 ± 0.26	22.03 ± 0.79	14.99 ± 0.53	8.51 ± 0.09	72.30%
	3	120	54.93 ± 0.53	34.21 ± 1.06	10.87 ± 0.53	6.20 ± 0.03	50.26%
21	1	40	56.42 ± 0.53	25.97 ± 1.06	17.61 ± 0.53	5.08 ± 0.40	54.36%
	2	80	60.55 ± 0.00	29.53 ± 0.79	9.93 ± 0.79	7.79 ± 0.41	65.64%
	3	120	62.98 ± 0.26	17.35 ± 0.53	19.67 ± 0.26	10.35 ± 1.14	72.30%

En el caso de la lignina se reduce de 23.43% a valores entre 5.03 % y 13.86 %, dependiendo de la condición. Las condiciones más agresivas (mayor NaOH y temperatura) logran mayor des lignificación. Además, considerando el rendimiento varía entre 52.82 % y 74.88 %, siendo más alto en condiciones suaves pero prolongadas, lo que favorece la preservación de la matriz celulósica.

Con estos datos interpretamos que bajo tratamiento Kraft, se logra una conversión efectiva hacia alfa celulosa y una remoción significativa de lignina, especialmente en condiciones de baja concentración de NaOH.

Para el caso de la borra de café el análisis de la tabla 3.3 indica que, para la temperatura, se obtuvo un valor de $F = 7.68$ con una $p = 0.0051$, lo cual demuestra que existen diferencias significativas entre los niveles de temperatura evaluados. De manera similar, el factor tiempo presentó un valor de $F = 7.68$ y una $p = 0.0051$, confirmando también un efecto significativo sobre el contenido de alfa celulosa.

El factor concentración presentó un valor de $F = 0.88$ y $p = 0.4364$, por lo que no se observaron diferencias estadísticas significativas entre los niveles analizados. Esto implica que, dentro del rango de concentraciones utilizadas, las variaciones en la concentración del agente químico no producen un cambio notable en el contenido de alfa celulosa.

Tabla 3.3 ANOVA de borra de café

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F-RATIO	P-VALUE
Alfa celulosa y temperatura					
Between groups	109.754	2	54.8771	7.68	0.0051
Within groups	107.224	15	7.14827		
Total (Corr.)	216.978	17			
Alfa celulosa y Tiempo					
Between groups	109.754	2	54.8771	7.68	0.0051
Within groups	107.224	15	7.14827		
Total (Corr.)	216.978	17			
Alfa celulosa y concentración					
Between groups	22.7097	2	11.3548	0.88	0.4364
Within groups	194.269	15	12.9512		
Total (Corr.)	216.978	17			
Análisis de Varianza de alfa celulosa					
MAIN EFFECTS					
A: concentración	22.7097	2	11.3548	1.75	0.2129
B: temperatura	109.754	2	54.8771	8.44	0.0045
RESIDUAL	84.5143	13	6.5011		
TOTAL (CORRECTED)	216.978	17			

El análisis de varianza (ANOVA) permitió evaluar la influencia de los factores de temperatura, tiempo y concentración sobre el contenido de alfa celulosa obtenido. Donde evidencian diferencias significativas para los factores de temperatura y tiempo, mientras que la concentración de NaOH no mostró un efecto significativo.

Con los datos del análisis ANOVA se determina que para la borra las variables que influyen son tiempo y temperatura por lo que, comparando estas variables con el rendimiento de los experimentos, siendo el experimento 2 a condiciones de tiempo (H), temperatura (80°C) y concentración de NaOH (7%).

- b) Pruebas Kraft cascarilla de café En el caso de los análisis post tratamiento de la cascarilla tabla 3.4 se observó que el alfa celulosa se incrementó notablemente en todos los tratamientos, alcanzando hasta 52.88%, lo que representa una mejora significativa respecto al valor inicial (19.82%).

Tabla 3.4 Caracterización de experimentos de cascarilla

CONDICIONES KRAFT			ALFA CEL (%)	BETA CEL (%)	GAMMA CEL (%)	LIGNINA (%)	REND (%)
[%] NAOH	T (H)	TEMP. (°C)					
7	1	40	52.86 ± 0.79	28.89 ± 0.85	18.25 ± 0.05	5.75 ± 0.06	179.07%
	2	80	40.87 ± 0.79	44.74 ± 0.74	14.39 ± 0.05	7.43 ± 0.23	115.78%
	3	120	41.25 ± 0.26	47.60 ± 0.24	11.15 ± 0.03	7.08 ± 0.07	117.76%
14	1	40	40.87 ± 2.38	39.75 ± 2.33	19.37 ± 0.05	3.67 ± 0.13	115.78%
	2	80	37.88 ± 0.26	50.94 ± 0.29	11.18 ± 0.03	11.57 ± 0.27	99.95%
	3	120	39.38 ± 0.26	41.63 ± 0.32	19.00 ± 0.05	10.46 ± 0.57	107.87%
21	1	40	41.81 ± 0.53	47.21 ± 0.58	10.98 ± 0.05	10.29 ± 0.22	120.72%
	2	80	40.69 ± 0.00	45.62 ± 0.03	13.69 ± 0.03	7.44 ± 0.06	114.79%
	3	120	47.99 ± 0.26	36.79 ± 0.32	15.21 ± 0.05	3.25 ± 1.05	153.36%

La beta celulosa disminuye y a gamma celulosa tiende a aumentar, especialmente en condiciones más agresivas (hasta 30.78 %), lo que puede reflejar degradación de hemicelulosas o formación de cadenas cortas solubles (García-Berfon et al., 2021).

La lignina en la cascarilla se reduce de 19.70 % a valores como 3.25 %, dependiendo de la condición. Las mejores condiciones de deslignificación se observan con 14% NaOH a baja temperatura y corto tiempo, o con 21 % NaOH a 120 °C.

Con esta información la cascarilla de café muestra una matriz altamente rica en beta celulosa y holocelulosa, con baja proporción inicial de alfa celulosa. Los tratamientos Kraft permiten una conversión efectiva hacia alfa celulosa y una remoción significativa de lignina, aunque con variabilidad en la eficiencia según las condiciones. Las condiciones más suaves (baja temperatura y tiempo corto) con concentraciones intermedias de NaOH parecen ofrecer un buen balance entre purificación y rendimiento.

El análisis de varianza que se realizó para los resultados de la cascarilla de café de la tabla 3.5 para determinar el efecto de las variables ya mencionadas sobre el contenido de alfa celulosa muestra que ninguno de los factores evaluados presenta diferencias estadísticamente significativas dentro del nivel de confianza del 95 %.

Tabla 3.5 ANOVA de cascarilla de café

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F-RATIO	P-VALUE
Alfa celulosa y temperatura					
Between groups	87.0881	2	43.544	2.34	0.1302
Within groups	278.841	15	18.5894		
Total (Corr.)	365.929	17			
Alfa celulosa y Tiempo					
Between groups	87.0881	2	43.544	2.34	0.1302
Within groups	278.841	15	18.5894		
Total (Corr.)	365.929	17			
Alfa celulosa y concentración					
Between groups	101.654	2	50.827	2.88	0.0871
Within groups	264.275	15	17.6183		
Total (Corr.)	365.929	17			
Análisis de Varianza de alfa celulosa					
MAIN EFFECTS					
A: concentración	101.654	2	50.827	3.73	0.0525
B: tiempo	87.0881	2	43.544	3.19	0.0744
RESIDUAL	177.187	13	13.6298		
TOTAL (CORRECTED)	365.929	17			

En el caso de la temperatura, se obtuvo un valor de $F = 2.34$ y un $p = 0.1302$, lo cual indica que el valor de p es mayor que 0.05 , por lo que no existen diferencias significativas entre los niveles de temperatura probados.

De forma similar, el tiempo presentó valores de $F = 2.34$ y $p = 0.1302$, confirmando que las variaciones en la duración del tratamiento no influyen de manera significativa en el contenido de alfa celulosa obtenido.

El factor concentración mostró un valor de $F = 2.88$ y $p = 0.0871$, el cual, aunque es menor que los anteriores, aún supera el nivel de significancia ($p > 0.05$), por lo que no se considera estadísticamente significativo. Esto sugiere que las diferencias en la concentración del agente químico no generan un cambio relevante en la cantidad de alfa celulosa producida.

El ANOVA general respalda estos resultados, con valores de $p = 0.0525$ para la concentración, $p = 0.0744$ para la temperatura y $p = 0.0871$ para el tiempo, todos mayores a 0.05 . Por lo tanto, ninguno de los factores estudiados (temperatura, tiempo o concentración) ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre el contenido de alfa celulosa.

Para el caso de la cascarilla, el análisis determina que no hay diferencias significativas con la variación de estas condiciones por lo que se tomó la decisión con base en el rendimiento de cada experimento como se ilustra en la tabla 3.4 siendo el óptimo el rendimiento de 179.07% que es a las condiciones más bajas (7% , $1H$ y $40^{\circ}C$).

c) Pruebas Kraft pulpa de café

Para la caracterización de la pulpa de café (Tabla 3.6) los resultados demuestran que la alfa celulosa se incrementa en todos los tratamientos, alcanzando hasta 45.96% , lo que representa una mejora respecto al valor inicial (34.18%).

La beta celulosa disminuye en la mayoría de los casos, la gamma celulosa aumenta considerablemente (hasta 32.79%) y la lignina reduce drásticamente desde 84.61% a

valores entre 5.61 % y 13.28 %, lo que demuestra que el tratamiento Kraft es altamente efectivo para deslignificar esta matriz, aunque requiere condiciones agresivas.

Tabla 3.6 Caracterización de experimentos de pulpa

CONDICIONES KRAFT			ALFA CEL (%)	BETA CEL (%)	GAMMA CEL (%)	LIGNINA (%)	REND (%)
[%] NAOH	T (H)	TEMP. (°C)					
7	1	40	40.69 ± 0.00	26.90 ± 0.26	32.41 ± 0.26	9.28 ± 0.19	26.92%
	2	80	37.50 ± 0.26	36.64 ± 0.26	25.85 ± 0.53	13.28 ± 0.23	16.99%
	3	120	37.88 ± 0.26	37.02 ± 0.26	25.10 ± 0.00	10.75 ± 0.49	18.16%
14	1	40	45.00 ± 0.26	22.22 ± 0.53	32.79 ± 0.26	10.42 ± 0.49	40.36%
	2	80	36.57 ± 0.00	36.83 ± 0.00	26.60 ± 0.00	12.86 ± 0.23	14.06%
	3	120	48.37 ± 0.26	21.84 ± 0.00	29.79 ± 0.26	5.25 ± 0.16	50.88%
21	1	40	45.93 ± 0.00	28.21 ± 0.00	25.85 ± 0.00	6.43 ± 0.58	43.29%
	2	80	45.18 ± 0.53	33.27 ± 0.26	21.54 ± 0.26	13.05 ± 0.06	40.95%
	3	120	36.38 ± 0.26	35.15 ± 0.26	28.48 ± 0.00	5.51 ± 0.25	13.48%

La pulpa de café presenta una matriz altamente lignificada, lo que la hace difícil de procesar mediante métodos convencionales. Sin embargo, los tratamientos Kraft logran una remoción significativa de lignina y una mejora en la proporción de alfa celulosa que, a pesar de los bajos rendimientos, la pulpa podría ser una fuente valiosa de alfa celulosa.

Tabla 3.7 ANOVA de pulpa de café

SOURCE	SUM OF SQUARES	DF	MEAN SQUARE	F-RATIO	P-VALUE
Alfa celulosa y temperatura					
Between groups	54.397	2	27.1988	1.40	0.2777
Within groups	292.018	15	19.4678		
Total (Corr.)	346.415	17			
Alfa celulosa y tiempo					
Between groups	54.3976	2	27.1988	1.40	0.2777
Within groups	292.018	15	19.4678		
Total (Corr.)	346.415	17			
Alfa celulosa y concentración					
Between groups	73.0494	2	36.5247	2.00	0.1693
Within groups	273.366	15	18.2244		
Total (Corr.)	346.415	17			
Análisis de varianza de alfa celulosa					
MAIN EFFECTS					
A: concentración	73.0494	2	36.5247	2.17	0.1539
B: temperatura	54.3976	2	27.1988	1.61	0.2364
RESIDUAL	218.968	13	16.8437		
TOTAL (CORRECTED)	346.415	17			

Para el ANOVA de la tabla 3.7 de la pulpa de café el factor temperatura, se obtuvo un valor de $F = 1.40$ y un $p = 0.2777$, siendo p es superior al nivel de significancia ($p > 0.05$). Indicando que las variaciones en la temperatura no ejercen un efecto significativo sobre la cantidad de alfa celulosa obtenida.

De igual forma, el tiempo presentó los mismos valores ($F = 1.40$; $p = 0.2777$), lo que sugiere que la duración del tratamiento tampoco afecta el contenido de alfa celulosa bajo las condiciones experimentales utilizadas. En cuanto a la concentración, el análisis mostró un valor de $F = 2.00$ y $p = 0.1693$, resultado que también supera el umbral de significancia ($p > 0.05$). Por lo tanto, no se observan diferencias entre los niveles de concentración empleados.

El ANOVA general confirma estos resultados, mostrando valores de $p = 0.1539$ para la concentración y $p = 0.2384$ para la temperatura, ambos mayores a 0.05. En consecuencia, no se detectan efectos significativos de los factores principales sobre la respuesta analizada. Para la pulpa se seleccionó el experimento 6 que tiene el 50.88% de rendimiento en tiempo (3H), temperatura (120°C) y concentración de NaOH (14%).

3.4.2 Digestión Kraft para residuos de café

Ya que se identificaron las condiciones óptimas de la extracción para la borra (2H, 80°C, NaOH 7%), cascarilla (1H, 40°C, NaOH 7%) y pulpa (3H, 120°C, NaOH 14%) se procedió a extracción Kraft, para esto se pesaron 2 kg de cada tipo de muestra figura 3.41, y se cargó una olla de acero inoxidable de 11 L con la muestra de materia prima y con 4 L de NaOH a la concentración correspondiente.

Una vez cargado el reactor, se realizó el proceso de cocción como se ilustra en la figura 3.42 y 3.43. Posteriormente se filtró y enjuago la muestra obtenida para proceder con el proceso de blanqueo.



Figura 3.42 Pesado de materia prima



Figura 3.43 Equipo utilizado para extracción Kraft

Finalizado el enjuague inicial de la muestra, se procedió al tratamiento de blanqueo con H_2O_2 ; Para ello, la muestra fue sumergida en un recipiente, y se mantuvo en contacto durante 24 horas a temperatura ambiente, este paso tuvo como objetivo la mejora de las propiedades ópticas de la fibra, favoreciendo una mayor blancura sin comprometer su integridad estructural.

Finalizado el tiempo de exposición, se realizó un segundo enjuague con agua destilada para remover cualquier residuo de reactivo. Posteriormente, las fibras fueron dispuestas en bandejas limpias y se dejaron secar al ambiente. Una vez secas, las fibras blanqueadas estuvieron listas para ser utilizadas en la etapa de formación de hojas de papel, donde se evaluaron sus propiedades físicas y mecánicas.

3.4.3 Celulosa de papel reciclado

Como la finalidad del proyecto es que sea un proceso sostenible, se decidió omitir el proceso de blanqueo en las fibras de celulosa de papel, para evitar el gasto en reactivos y consumo de agua, además de evaluar así las propiedades del papel sin aditivos ni procesos alternativos al papel para mantenerlo artesanalmente.

3.5 FORMULACIÓN

Para la propuesta de mezclas se realizó una determinación de humedad para calcular la cantidad de muestra según los porcentajes propuestos para la formación de hojas como se muestra en la tabla 3.8, 3.9 y 3.10 donde se consideró un blanco que fue producido 100% de fibras de papel reciclado.

Tabla 3.8 Porcentajes de formación de hojas de borra de café

BORRA	CELULOSA	g CEL	PAPEL	g PAPEL
BNCO	0%	0.00	100%	30.46
BO1	20%	35.52	80%	24.37
BO2	30%	53.29	70%	21.32
BO3	40%	71.05	60%	18.28
BO4	50%	88.81	50%	15.23
BO5	60%	106.57	40%	12.18
BO6	80%	142.10	20%	6.09
BO7	100%	177.62	0%	0.00

Para la formación de las hojas se colocaron los gramajes correspondientes en un litro de agua y se homogeneizó, se divide en 10 mL para mantener un gramaje de 3 g/m³ y se coloca en un embudo de porcelana con un papel filtro en una bomba de vacío para la formación de las hojas (Tortillas) como se ilustra en el anexo D.

Tabla 3.9 Porcentajes de formación de hojas de cascarilla de café

BORRA	CELULOSA	g CEL	PAPEL	g PAPEL
BNCO	0%	0.00	100%	30.46
CA1	20%	19.20	80%	24.37
CA2	30%	28.80	70%	21.32
CA3	40%	38.40	60%	18.28
CA4	50%	48.00	50%	15.23
CA5	60%	57.60	40%	12.18
CA6	80%	76.80	20%	6.09
CA7	100%	96.00	0%	0.00

Posteriormente se colocaron en un horno durante 4 minutos a 90°C, se retiró del horno, se comprimió con dos planchas para dar mejor textura a la hoja y se terminó de secar al ambiente durante 24 horas; Si bien se hizo la propuesta de 7 mezclas, a la hora de su producción solo alcanzaron a formarse de manera adecuada hasta el 60/40% sin aditivos, a partir del porcentaje las hojas comenzaron a romperse como se muestra en el anexo D.

Tabla 3.10 Porcentajes de formación de hojas de pulpa de café

BORRA	CELULOSA	g CEL	PAPEL	g PAPEL
BNCO	0%	0.00	100%	30.46
PU1	20%	25.03	80%	24.37
PU2	30%	37.55	70%	21.32
PU3	40%	50.06	50%	15.23
PU4	50%	62.58	60%	18.28
PU5	60%	75.09	40%	12.18
PU6	80%	100.13	20%	6.09
PU7	100%	125.16	0%	0.00

3.6 ESTÁNDARES DE CALIDAD

La evaluación de los estándares de calidad de las “tortillas” de papel, se le realizaron las pruebas mencionadas en la tabla 2.6 para cada prueba se enviaron 2 muestras realizadas en diferentes fechas, se realizaron por duplicado, el registro de los valores de cada matriz se expresa en la tabla 3.11 para borra, 3.12 para cascarilla y 3.13 para pulpa.

Para la selección de la mejor composición se analizaron los valores de cada parámetro, comparándolos con los valores que indica la normatividad (se seleccionaron aquellos que se encontraban dentro de los parámetros de la tabla 2.6, si bien algunos de ellos tenían variación, se optó por la proporción que tuviera el mayor número de parámetros en norma.

Tabla 3.11 Resultados pruebas de calidad de borra

MTRA	CALIBRE (m in)		DS ±	GRAMAJE (g/m²)		DS ±	PORO- SIDAD (s)			DS ±	HUME- DAD (%)		DS ±	MULLEN (lb/in²)		DS ±	ENCO- LADO (s)		DS ±
BNCO	39.7	34.1	3.1	236.5	241.5	3.5	3.6	1.6	1.4	4.9	7.1	1.6	27.0	28.0	0.7	1.0	1.0	0.0	
BO1	32.2	43.8	8.2	267.0	243.0	17.0	1.5	0.8	0.5	6.4	8.3	1.3	21.5	27.0	3.9	1.0	1.0	0.0	
BO2	37.9	38.2	0.2	237.0	192.5	31.5	0.6	0.6	0.0	5.5	6.7	0.8	28.5	24.5		2.8	1.0	1.0	0.0
BO3	59.7	44.9	10.4	169.0	225.5	40.0	0.3	0.5	0.1	8.7	7.6	0.8	26.5	28.5	1.4	1.0	1.0	0.0	
BO4	36.8	37.1	0.2	268.0	250.5	12.4	0.4	0.7	0.2	7.7	7.1	0.5	29.0	30.0	0.7	1.0	1.0	0.0	
BO5	53.6	33.9	13.9	207.0	220.0	9.2	0.3	1.3	0.7	8.4	7.5	0.6	28.5	26.5	1.4	1.0	1.0	0.0	

Los resultados de la borra de café (tabla 3.11) indica para el calibre valores superiores al valor estándar (39.3) sin embargo se hizo la selección de la relación 30:70 que corresponde a la muestra BO2, en cuanto al gramaje, la muestra BO4 es la que más se aproxima al valor estándar.

Respecto a la porosidad, destacó la muestra BO2 como la más favorable en este aspecto, debido a que ambas muestras presentaron el mismo valor y este se encuentra entre los rangos establecidos por la norma.

En el caso de la humedad, BO2 también presentó los valores más cercanos a los parámetros establecidos. Para el parámetro Mullen, la muestra BO4 se posiciona como la muestra más próxima al valor deseado, ya que todos los demás se encontraron por debajo del límite inferior.

Finalmente, el encolado mostró valores constantes en todas las muestras, esto se debió principalmente a que no se utilizaron encolantes en la preparación del papel, lo que mantiene su resistencia a la humedad en el mismo valor.

En base a esta evaluación comparativa, se determinó que la proporción 30:70 (muestra BO2) es la opción que presenta mayor concordancia con los parámetros de calidad definidos para papel adicionado con borra de café.

Tabla 3.12 Resultados pruebas de calidad de cascarilla

MT RA	CALIBRE (m in)		DS	GRAMAJE (g/m ²)		DS	POROSI DAD (s)		DS	HUME DAD (%)		DS	MULLEN (lb/in ²)		DS	ENCO LADO (s)		DS
CA1	36.2	48.0	8.3	240.0	271.5	22.3	0.4	1.8	1.0	7.1	7.5	0.3	32.0	34.5	1.8	1.0	1.0	0.0
CA2	35.3	38.6	2.4	268.5	233.0	25.1	1.1	1.7	0.5	7.4	6.6	0.6	31.0	32.0	0.7	1.0	1.0	0.0
CA3	36.4	29.1	5.1	288.5	208.0	0.4	1.1	1.4	0.2	6.8	6.2	0.4	29.0	29.5	0.4	1.0	1.0	0.0
CA4	36.7	27.3	6.6	277.0	225.5	36.4	0.6	2.1	1.1	8.6	6.7	1.3	34.0	29.5	3.2	1.0	1.0	0.0
CA5	37.6	38.1	0.4	254.0	233.5	14.5	0.5	1.4	0.6	9.7	6.2	2.5	30.0	26.0	2.8	1.0	1.0	0.0

Para el caso de la cascarilla tabla 3.12 se selecciona la muestra en la que los parámetros presentan las mejores condiciones es en la muestra CA3 (relación 40:60), si bien el gramaje no fue el que dio el mejor resultado, los otros 5 parámetros se mantuvieron dentro de los rangos establecidos por las normas y con desviaciones estándar mínimas.

Con base en esta evaluación comparativa, se determinó que la proporción 40:60 (muestra CA3) es la opción que presenta mayor concordancia con los parámetros de calidad definidos para la cascarilla de café.

Tabla 3.13 Resultados pruebas de calidad de pulpa

MTRA	CALIBRE (m in)		DS	GRAMAJE (g/m²)		DS	POROSI DAD (s)			DS	HUME DAD (%)		DS	MULLEN (lb/in²)		DS	ENCO LADO (s)		DS
PU1	37.1	49.4	8.7	222.0	259.0	26.2	1.2	0.9	0.2	7.7	6.7	0.7	33.0	31.5	1.1	1.0	1.0	0.0	
PU2	53.1	37.5	11.0	223.5	264.5	29.0	1.2	1.1	0.0	8.9	7.1	1.3	28.0	33.0	3.5	1.0	1.0	0.0	
PU3	33.1	27.1	4.3	250.5	260.5	7.1	1.0	0.4	0.4	6.6	6.2	0.3	32.5	29.0	2.5	1.0	1.0	0.0	
PU4	35.5	28.5	4.9	192.0	206.5	10.3	1.1	1.1	0.0	7.3	7.8	0.4	33.0	25.5	5.3	1.0	1.0	0.0	
PU5	37.9	38.5	0.5	225.0	238.5	9.5	1.1	1.2	0.1	8.1	7.4	0.5	26.5	29.0	1.8	1.0	1.0	0.0	

Los resultados de la pulpa de café tabla 3.13 expresaron de igual manera que en la cascarilla, que la muestra con mayor calidad es la PU3 (40:60), en este caso los parámetros que se mantuvieron dentro de los rangos fueron el gramaje, la porosidad, la humedad, la resistencia y el encolado. En el caso de la porosidad, una de las muestras cae por

De esta evaluación comparativa, se determinó que la proporción 40:60 (muestra PU3) es la opción que presenta mayor concordancia con los parámetros de calidad definidos para la pulpa de café.

3.7 EVALUACIÓN SOSTENIBLE

Para la evaluación sostenible del proceso propuesto, se consideraron no solo los aspectos económicos como los costos de inversión de equipos, el lugar de trabajo, los costos de materias primas, gasto energético, mano de obra y venta, sino también de los beneficios ambientales y sociales asociados a la producción sostenible de papel artesanal elaborado con residuos de café y papel bond usado.

A continuación, se describen los aspectos considerados para la conformación de cada uno de los procesos y selección de los equipos, cuidando las necesidades del proceso para ello se hizo acopio de información en páginas de proveedores tales como Mesumex, Wuhan

Plastech Machinery Co., Ltd, Charles Comercializadora Potosina del Centro, Food machine manufacturer, kexing, UD Machine, Laboteca, Hebe Cosmetics, el crisol, entre otras.

Se propone una planta en una nave industrial, en la que se realizaran las operaciones con tres líneas de producción (una para cada residuo de café), además de área de laboratorio, oficinas, área de comida y patio de maniobras.

3.7.1 Evaluación técnica

Cada una de las líneas de producción tienen ciertas necesidades específicas, esto debido a las características fisicoquímicas de cada una de ellas, estas especificaciones de proceso se describen en los siguientes incisos.

a) Producción de borra: El proceso industrial propuesto para elaborar papel artesanal con residuos de borra de café y papel bond usado se ilustra en el diagrama de bloques de la figura 3.44.

Es importante mencionar que la máquina de papel Fourdrinier tiene capacidad de producción de 1 lb/min (0.653 t/día) donde se establece una merma del 20% esta máquina cuenta con un hidropulper en el que se colocan las cantidades necesarias tanto de borra de café como de papel usado (Tabla 3.8) para su formación de hojas con rodillos, su posterior corte y empaquetado.

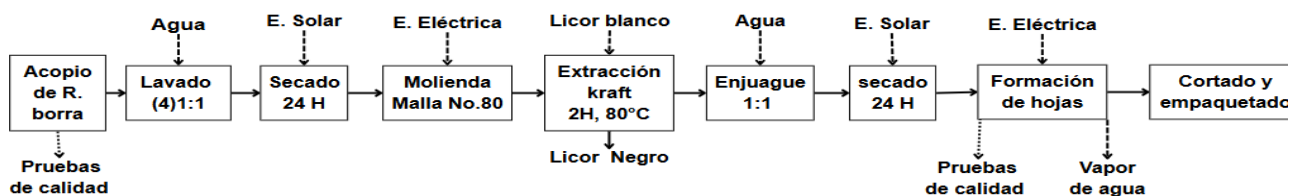
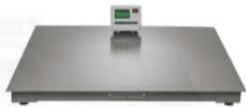


Figura 3.44 Diagrama de bloques producción de papel con borra

Para este proceso son necesarios los equipos que se enlistan en la tabla 3.14 para cada etapa, seleccionando para cada una de ellas, el equipo con las menores

dimensiones y costo pero que cumpliera con los requerimientos de materiales y potencia para obtener la producción establecida.

Tabla 3.14 Equipos para producción de papel con celulosa de borra de café

ETAPA	FIGURA Y NOMBRE DEL EQUIPO	CANTI-DAD	COSTO	PROVEEDOR /MARCA	ESPECIFICACIONES	CONSUMO ENERGÉTICO (kw/h)
Acopio de residuos	Bascula 	1	\$13,809.49	Mesumex (2025)	Medidas 1 m X 1m 1 ton	0.002
Lavado y secado	Tanque de lavado 	1	\$312,000.00	Weshine Machinery (2025)	Medidas 3.5 mx 2 x 0.8m 1 ton	0.7
Molienda	Molino 	1	\$15,000.00	Charles Comercializadora Potosina del Centro (2025)	Medidas 89 cm x 80 cm x 54 cm 60 kg/h	0.75
Extracción kraft	Reactor extracción Kraft 	1	\$97,105.96	Food machine manufacturer (2025)	Medidas 80,00 cm * 75,00 cm * 150,00 cm de 200 kg	0.56
Blanqueo	Tanque para blanqueo 	1	\$42,000.00	Kexing (2025)	Medidas 1.5m*4.5m y espesores de carcasa de 3mm-5mm, 1.5 ton	3
Enjuague	Tanque de lavado 	1	\$312,000.00	Weshine Machinery (2025)	Medidas 3.5 mx 2 x 0.8m 1 ton	0.7
Formación de hojas	Máquina de papel Fourdrinier 	1	\$1,102,719.80	UD Machine (2025)	Capacidad 1 lb/ min	1.1
Total		7	\$1,894,635.25			

b) Producción de cascarilla: El proceso de producción de papel artesanal de cascarilla de café se ilustra en la figura 3.45, si bien en esencia es similar al proceso de la borra, tiene necesidades específicas que lo vuelven particular, en este caso no se requiere lavado posterior a su acopio, además el proceso Kraft de extracción de celulosa opera bajo 1 hora a 40°C y la proporción con papel usado es de 40:60.

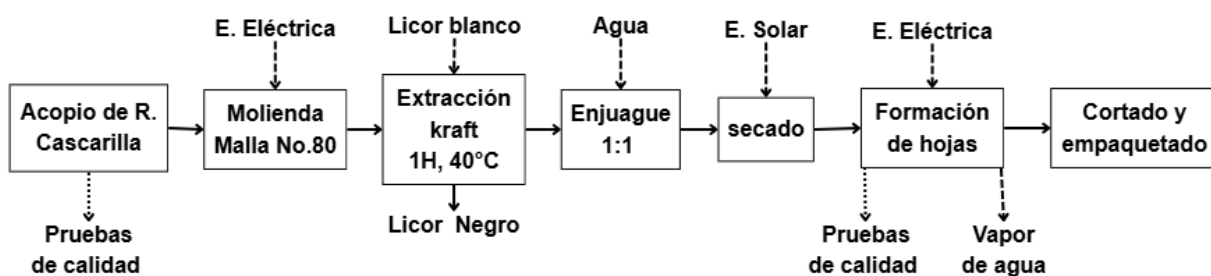


Figura 3.45 Diagrama de bloques producción de papel con cascarilla

Si bien los equipos a utilizar son los mismos que en el proceso anterior, el no necesitar el lavado de la materia prima, reduce los costos tanto para la compra de equipos, como para el gasto energético (Tabla 3.15)

Tabla 3.15 Equipos para producción de papel con celulosa de cascarilla de café

ETAPA	FIGURA Y NOMBRE DEL EQUIPO	CANTI-DAD	COSTO	PROVEE DOR /MARCA	ESPECIFICA CIONES	CONSUMO ENERGÉTICO (kw/h)
Acopio de residuos	Bascula 	1	\$13,809.49	Mesumex (2025)	Medidas 1 m X 1m	0.002
Molienda	Molino 	1	\$15,000.00	Charles Comercializ adora Potosina del Centro (2025)	Medidas 89 cm x 80 cm x 54 cm	0.75
Extracción Kraft	Reactor Kraft 	1	\$97,105.96	food machine manufactur er (2025)	Medidas 75,00 cm * 150,00 cm de 200 L	0.56

Tabla 3.15 Equipos para producción de papel con celulosa de cascarilla de café (Continuación)

ETAPA	FIGURA Y NOMBRE DEL EQUIPO	CANTI-DAD	COSTO	PROVEE DOR /MARCA	ESPECIFICA CIONES	CONSUMO ENERGÉTICO (kw/h)
Blanqueo	Tanque para blanqueo 	1	\$42,000.00	Kexing (2025)	Medidas 1.5m*4.5m y espesores de carcasa de 3mm-5mm,	3
Enjuague	Tanque de lavado 	1	\$312,000.00	Weshine Machinery (2025)	Medidas 3.5 mx 2 x 0.8m	0.7
Formación de hojas	Máquina de papel Fourdrinier 	1	\$1,102,719.80	UD Machine (2025)	Capacidad 1 lb/ min	1.1
Total		6	\$1,582,635.25			6.112

c) Producción de pulpa: Por último, para el proceso de producción de papel artesanal con pulpa de café (Figura 3.46), por sus características fisicoquímicas iniciales, se necesitan los mismos equipos que para el proceso de la borra de café, sin embargo la pulpa requiere 4 lavados 1:2, lo que aumenta el costo de servicios, ya que el consumo energético y de agua aumentan en esta etapa del lavado, además en la extracción Kraft el tiempo de cocción aumenta a 3 h y 120 °C con proporción 40:60 de celulosa de pulpa y papel usado.

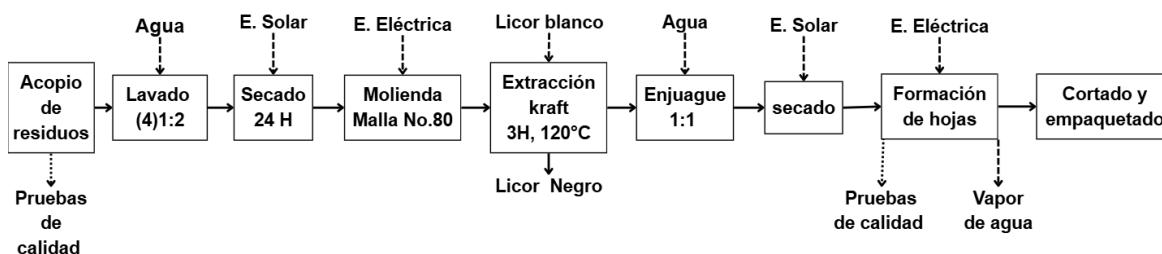


Figura 3.46 Diagrama de bloques producción de papel con pulpa

3.7.2 Evaluación socioeconómica

Para la instalación de la planta se necesita un área industrial. Se realizaron cotizaciones en el Valle de Toluca, seleccionándose una bodega en San Mateo Atenco, Edo. de México, con una superficie de 2000m², dicha propiedad cuenta con todos los servicios necesarios, una calle amplia para maniobras, y una excelente ubicación estratégica. El costo de renta mensual para este predio es de \$150,000.00 (ciento cincuenta mil pesos 00/100 MXN), el cual se prorrateó entre los tres procesos (Inmuebles24, 2025).

La ubicación de dicha bodega es estratégica para la comunicación y el acceso rápido entre la Ciudad de México y el sur del Estado de México, debido a que se encuentra cerca del cruce de la Avenida Torres y Calle Lerma, que conecta con vías principales (Figura 3.47). Esta zona facilitará la logística de almacenamiento, negocio y tránsito de la planta.

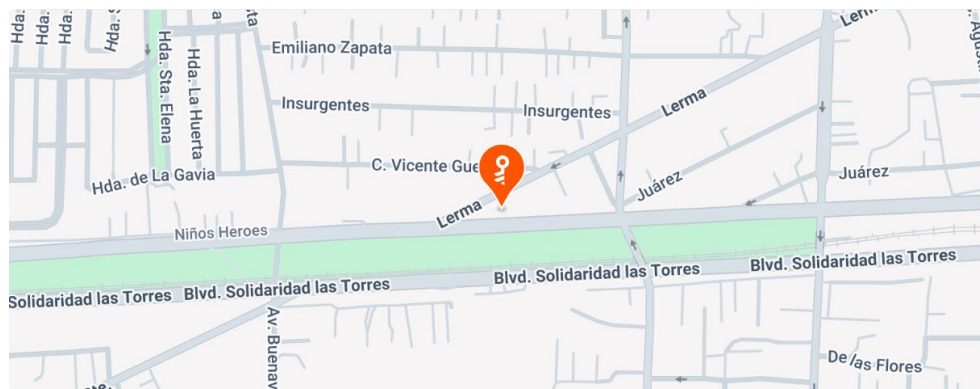


Figura 3.47 Ubicación de lugar de trabajo

De las dimensiones de la nave industrial, 400m² son de oficinas en 2 pisos (Figura 3.48), de esta, el primer piso cuenta con baño de mujeres con dos WC y lavabo, baño de hombres con WC, mingitorio y lavabo, cocina, dos regaderas, sala de juntas, comedor, dormitorio y vestidores, el segundo piso cuenta con baño de mujeres con WC y lavabo, baño de hombres con un WC y lavabo, cuarto de coffee break y archivo, sala de espera, oficina principal cerrada con su baño, WC, lavabo y regadera.



Figura 3.48 Área de oficinas de nave industrial

También cuenta con un área de operaciones techada de 1,600 m² (Figura 3.49) en la que se pretende se pretende colocar las tres líneas de producción, una para cada residuo y se destinará un área de recepción de materias primas de 200m², además la altura de la bodega es de 4.5m, en la parte más baja y 6.5m en la parte más alta. Cisterna con capacidad de 20,000L.



Figura 3.49 Área de operación

Para los costos de materia prima se realizaron los cálculos con base los requerimientos iniciales de producción, que se muestran en la tabla 3.16. En principio, la materia prima de residuos de café no tenía costo, sin embargo, había que transportarlos de la finca a la planta, por lo que se estimó el costo aproximado, considerando su transporte mediante camiones de tres toneladas, para una producción de 0.653 t/día de papel artesanal en cada línea de producción.

Se consideró el 20% de merma en cada proceso, por ello se requieren 0.784 t/día de materia prima (residuo específico de café y papel usado). Para el caso de papel bond usado como materia prima, se investigó en varios centros de acopio su precio de compra, estableciendo para este trabajo \$ 2.00 (Dos pesos 00/100 MXN) por kilogramo en la puerta de la planta.

Tabla 3.16 Costos de materias primas

Matriz	Composición		Celulosa t/día	Papel t/día	Camiones /año	Costos anuales de residuos cafetaleros	Costos anuales de papel usado	Costo total de materia prima
	Café	Papel						
Borra	30%	70%	0.235	0.549	23	\$59,800.00	\$316,030.74	\$375,830.74
Cascarilla	40%	60%	0.314	0.470	31	\$80,600.00	\$270,883.49	\$351,483.49
Pulpa	40%	60%	0.314	0.470	31	\$80,600.00	\$270,883.49	\$351,483.49

Para cada proceso se requieren pruebas de laboratorio, tanto en materia prima como del producto terminado. Para esto se necesitan los equipos y materiales que se muestran en las tablas 3.17 y 3.18 respectivamente, los cuales se seleccionaron considerando tanto características técnicas como menor precio. Debido a que con estos equipos se pueden realizar de 1 a 6 pruebas simultaneas, el costo de su compra se prorrateó entre los tres procesos.

Tabla 3.17 Equipos de laboratorio

FIGURA Y NOMBRE DEL EQUIPO	PRECIO UNITARIO	CANTI DAD	COSTO	PROVEE DOR /MARCA	ESPECI FICACI ONES	CONSUMO ENERGETICO kw/h
Extracción Soxhlet 	\$3,000.00	1	\$3,000.00	Foss (2025)	640 × 350 × 630 mm	1800
Mufla 	\$27,000.00	1	\$27,000.00	Laboteca (2025)	260 x 360 x 37 mm	1500
Estufa 	\$20,740.80	1	\$20,740.80	Laboteca (2025)	580 x 550 x 440 mm	750
Agitador 	\$8,679.96	2	\$17,359.92	Laboteca (2025)	18 x 23 x 10 cm	10

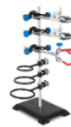
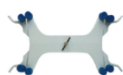
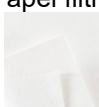
Tabla 3.17 Equipos de laboratorio (Continuación)

FIGURA Y NOMBRE DEL EQUIPO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO	PROVEEDOR /MARCA	ESPECIFICACIONES	CONSUMO ENERGETICO kw/h
Bomba de vacío 	12,518.72	1	\$12,518.72	Laboteca (2025)	Capacidad 23 L / min	65
Rycob Crush Tester 	\$82,000.00	1	\$82,000.00	Rycolab (2025)	155 mm x 566 mm x 555 mm	55
Densímetro Gurley 	\$75,000.00	1	\$75,000.00	Testing machine (2025)	254x 508 x 254 mm	NA
Micrómetro universal DM 	\$5,786	1	\$5,786.00	IDM (2025)	SD	Na
Medidor de espesor 	\$22,000.00	1	\$22,000.00	Mullen (2025)	SD	NA
Total	\$256,725.48		\$265,405.44			

Tabla 3.18 Materiales de laboratorio

FIGURA Y NOMBRE DEL EQUIPO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO	PROVEEDOR /MARCA	ESPECIFICACIONES
Desecador 	\$7,492.75	1	\$7,492.75	Laboteca (2025)	150 x 252 x 172 mm
VPP 500 	\$200.00	2	\$400.00	Hebbe Cosmetics (2025)	500mL
Matraz 500 	600.00	6	\$3,600.00	Laboteca (2025)	500 mL
Bureta de 50 mL 	\$900.00	2	\$1,800.00	EISCO (2025)	50 mL

Tabla 3.18 Materiales de laboratorio (*Continuación*)

FIGURA Y NOMBRE DEL EQUIPO	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO	PROVEEDOR /MARCA	ESPECIFICACIONES
 Gotero	\$20.00	1	\$20.00	Zanoreth (2025)	2 mL
 Embudo	\$100.00	6	\$600.00	Difte (2025)	9 cm
 Soporte universal	\$1,490.00	2	\$2,980.00	Vevor (2025)	Capacidad 10 mL
 Pinzas para bureta	\$255.20	1	\$255.20	Laboteca (2025)	SD
 Embudo Bushner	\$561.66	1	\$561.66	Laboteca (2025)	125 mL
 Papel filtro	\$8.00	1	\$8.00	Isse Labs (2025)	50 x 50 cm
 Cápsulas de aluminio	\$2.00	6	\$12.00	Genérica (2025)	genéricos
Total	\$11,629.61		\$17,729.61		

Para el consumo energético, la comisión federal de electricidad establece las tarifas de la siguiente manera:

- a) Consumo básico \$0.59 (Cero pesos 59/100 MXN) por cada uno de los primeros 300 kilowatts-hora
- b) Consumo intermedio bajo \$0.74 (Cero pesos 74/100 MXN) por cada uno de los siguientes 900 kilowatts-hora

c) Consumo intermedio alto \$1.80 (Un peso 80/100 MXN) por cada uno de los siguientes 1,300 kilowatts-hora

d) Consumo excedente: \$2.85 (Dos pesos 85/100 MXN) por cada kilowatt-hora adicional a los anteriores (CFE, 2024).

Considerando que se trata de una planta industrial, la tarifa a considerar fue la de \$2.85 (Dos pesos 85/100 MXN) por cada kilowatt-hora, el costo de su gasto energético se presenta en la tabla 3.19, el cual se prorrateó entre los tres procesos.

Cabe mencionar que para los primeros 4 equipos se consideró su utilización 31 veces al año, porque son para pruebas de calidad de materia prima, mientras que como la Bomba de vacío y el Rycob Crush Tester se utilizan en pruebas de calidad que se requieren diariamente, su operación fue de 288 días al año.

Tabla 3.19 Gasto energético de equipo de laboratorio

EQUIPO	CONSUMO kW/h	HORAS DE OPERACIÓN/ DIA	CONSUMO TOTAL / DIA kW/H	CONSUMO kW/AÑO	COSTO ANUAL
Extracción Soxhlet	1.8	6	10.8	334.8	\$957.19
Mufla	1.5	2	3	93	\$265.89
Estufa	0.75	12	9	279	\$797.66
Agitador	0.01	2	0.02	0.62	\$1.77
Bomba de vacío	0.065	3	0.195	56.16	\$160.56
Rycob Crush Tester	0.055	2	0.11	31.68	\$90.57
Total					\$2,273.65

En la tabla 3.20 se enlistan los reactivos necesarios para los análisis de calidad de las muestras de residuos, para estos se consideraron 23 pruebas al año para la borra y 31 pruebas al año para la pulpa y la cascarilla debido a que a cada camión de materia prima se le realizará una prueba de calidad, en la penúltima columna se enlistan los costos anuales de reactivos para la borra y en la última para la cascarilla y la pulpa.

Tabla 3.20 Reactivos para pruebas de laboratorio

REACTIVOS	PRECIO (MXN)	UNIDAD	CANTIDAD DIARIA	COSTO DIARIO	COSTO ANUAL DE BORRA	COSTO ANUAL CASCARILLA Y PULPA
C ₂ H ₅ OH	\$64.99	1L	0.24 L	\$15.60	\$358.74	\$483.53
C ₆ H ₅ CH ₃	\$973.00	1L	0.48 L	\$467.04	\$10,741.92	\$14,478.24
H ₂ O (Tipo A)	\$14.00	1L	0.45 L	\$6.30	\$144.90	\$195.30
H ₂ SO ₄	\$180.00	1L	0.11 L	\$20.25	\$465.75	\$627.75
CH ₃ COOH	\$762.59	1L	0.56 L	\$428.96	\$9,866.01	\$13,297.66
(CH ₃) ₂ CO	\$189.00	1L	0.08 L	\$14.18	\$326.03	\$439.43
NaOH	\$99.75	1L	11.43 L	\$1,139.64	\$26,211.81	\$35,328.96
K ₂ Cr ₂ O ₇	\$1,020.00	1kg	0.03 kg	\$30.60	\$703.80	\$948.60
(NH ₄) ₂ SO ₄	\$190.00	1kg	0.09 kg	\$17.10	\$393.30	\$530.10
[Fe(phen) ₃] ²⁺	\$77.00	100 mL	0.15 mL	\$11.55	\$265.65	\$358.05
H ₂ O (uso industrial)	\$1.00	1L	248.21 L	\$248.21	\$5,708.72	\$7,694.36
H ₂ O ₂	\$50.00	1 L	248.21 L	\$12,410.25	\$285,435.75	\$384,717.75
Total				\$14,809.67	\$340,622.37	\$459,099.71

Para la estimación del costo de mano de obra, se consideró el Salario Mínimo General (SMG) en México para el año 2025, que es \$286.27 (Doscientos ochenta y seis pesos 27/100 MXN) para diarios, lo que equivale a un ingreso mensual en SMG de \$8,701.00 (Ocho mil setecientos un peso 00/ 100 MXN) (PROFEDET, 2025).

En la tabla 3.21 se presentan los salarios para cada tipo de empleado, considerando que los 288 días del año se laboran tres turnos (24 horas). Conforme a lo anterior, el número de personas se prorrateó entre los tres procesos, de manera que el monto total de \$5,076,636.00 (Cinco millones setenta y seis mil seiscientos treinta y seis pesos 00/100 MXN) corresponde a cada proceso.

Tabla 3.21 Costos de mano de Obra

PUESTO	CANTIDAD (24 h)	SALARIO MENSUAL (MXN)	PERSONAS POR PROCESO	SALARIO MENSUAL / PROCESO	SALARIO ANUAL/ PROCESO
Operadores	18	\$12,250.00	6	\$73,500.00	\$882,000.00
Supervisores	3	\$14,750.00	1	\$14,750.00	\$177,000.00
Analistas de Calidad	3	\$15,700.00	1	\$15,700.00	\$188,400.00
Almacenista	3	\$11,950.00	1	\$11,950.00	\$143,400.00
Gerente de Producción	1	\$20,750.00	0.33	\$6,916.67	\$83,000.00
Personal de Limpieza	3	\$8,701.00	1	\$8,701.00	\$104,412.00
Administrativo	2	\$14,250.00	0.66	\$9,500.00	\$114,000.00
Total, de Personal	33		11		
Total				\$141,017.67	\$1,692,212.00
Sumatoria					\$5,076,636.00

A continuación, se presentan los costos variables para cada línea de proceso, debido a que sus requerimientos son particulares:

- a) Costos de borra de Café: Para el análisis económico del proceso de la borra de café se consideran los equipos de la tabla 3.14, el consumo energético de la tabla 3.22, los insumos de la tabla 3.23. la tarifa para considerar fue la de \$2.85 (Dos pesos 85/100 MXN) por cada kilowatt-hora, el consumo energético varía de acuerdo con la línea de producción.

Tabla 3.22 Consumo energético proceso de borra de café

EQUIPO	CONSUMO kW/h	HORAS DE OPERACIÓN AL DIA	CONSUMO TOTAL AL DIA kW/h	CONSUMO kW/MES	CONSUMO kW/AÑO	COSTO ANUAL
Bascula	0.002	2.00	0.00	0.10	1.15	\$3.29
Tanque de lavado	0.70	20.00	14.00	336.00	4032.00	\$11,527.49
Molino	0.75	15.00	11.25	270.00	3240.00	\$9,263.16
Reactor Kraft	0.56	5.00	2.80	67.20	806.40	\$2,305.50
Tanque blanqueo	3.00	24.00	72.00	1728.00	20736.00	\$59,284.22
Tanque de lavado	0.70	20.00	14.00	336.00	4032.00	\$11,527.49
Máquina Fourdrinier	1.10	24.00	26.40	633.60	7603.20	\$21,737.55
Total			140.45	3370.90	40450.75	\$115,648.70

Para los insumos requerido para el proceso, se tomaron de acuerdo con la producción de papel, de la maquina formadora de hojas, con ello se calcularon los costos diarios, mensuales y anuales.

Tabla 3.23 Insumos de producción de papel con borra de café

MATERIAL	CANTIDAD /DIA	PRECIO UNITARIO	COSTO DIARIO	COSTO MENSUAL	COSTO ANUAL
Agua uso industrial (L)	2226.99	\$1.00	\$2,226.99	\$44,539.76	\$534,477.10
NaOH (kg)	32.92	\$99.75	\$3,283.76	\$65,675.14	\$788,101.66
Na ₂ S (kg)	1.18	\$5.50	\$6.47	\$129.41	\$1,552.98
H ₂ O ₂ (L)	1567.61	\$50.00	\$78,380.64	\$1,567,612.80	\$18,811,353.60
Total					\$20,135,485.34

Se realizó una tabla de resumen de costos (Ulrich, 1992) para compilar los costos de fabricación y obtener un costo total, considerando todos los gastos directos e indirectos mencionados en este apartado como se enlista en la tabla 3.24.

Tabla 3.24 Costos de producción de papel con borra de café

CLASIFICACIÓN	CONCEPTO	\$/año	\$/kg
Fabricación	Materias primas	\$375,830.74	\$1.66
	Insumos de proceso	\$20,135,485.34	\$89.20
	Reactivos para laboratorio	\$340,622.37	\$1.51
	Mano de obra de la operación (Operadores)	\$882,000.00	\$3.91
	mano de obra de obra analistas	\$188,400.00	\$0.83
	Mano de obra oficia, almacén y limpieza	\$444,812.00	\$1.97
Servicios	Mano de obra supervisores	\$177,000.00	\$0.78
	Electricidad (\$/kWh)	\$116,406.58	\$0.52
	Manejo de desechos (\$/kg)	\$9,029,449.73	\$40.00
	Mantenimiento y reparaciones (2-10% del capital fijo)	\$139,231.65	\$0.62
	Suministros de operación (10-20% de MyR)	\$20,884.75	\$0.09
	Cargos de laboratorio (10-20% de mano de obra de operación)	\$132,300.00	\$0.59
	Patentes y derechos (0.5% del gasto total)	\$2,389,395.50	\$10.58
Total (Costos directos de operación)		\$34,371,818.66	\$152.27
Indirectos	Generales (Nomina y planta, empackado, almacenamiento, (50-70% de la suma de mano de obra de operación, supervisión y mantenimiento)	\$1,015,327.20	\$4.50
	Impuestos locales (1-2% del capital fijo)	\$29,835.35	\$0.13
	Seguro (0.4-1% del capital fijo)	\$11,934.14	\$0.05
	Renta	\$600,000.00	\$2.66
Total, costos indirectos		\$1,657,096.70	\$7.34
Generales	Depreciación (10% del capital fijo)	\$198,902.36	\$0.88
	Costos administrativos	\$2,958,268.42	\$13.10
	Distribución y costos de venta	\$3,549,922.11	\$15.73
	Investigación y desarrollo	\$5,324,883.16	\$23.59
Costos totales generales		\$11,833,073.69	\$52.42
Costo total producción		\$48,060,891.41	\$212.91

El análisis de la tabla 3.24 muestra que el costo total de producción anual asciende a \$48,015,744.16 (Cuarenta y ocho millones quince mil setecientos cuarenta y cuatro pesos 16/100 MXN) con una inversión inicial de \$1,989,023.60 (Un millón novecientos ochenta y nueve mil veintitrés pesos 60/100 MXN) (Tabla 3.14, 3.17 y 3.18).

Asumiendo que se hace la venta de la totalidad de la producción, en paquetes de 100 hojas a un costo de \$525 (Quinientos veinticinco pesos 00/100 MXN) (Tabla 3.25) se tiene un ingreso por ventas (S) de \$52,671,790.08 (Cincuenta y dos millones seiscientos setenta y un mil setecientos noventa pesos 08/100 MXN) anuales y de \$233.33 (Doscientos treinta y tres pesos 33/100 MXN) por cada kg, con ello La ganancia bruta anual (R) antes del pago de impuestos es de \$4,610,898.67 (Cuatro millones seiscientos diez mil ochocientos noventa y ocho pesos 67/100 MXN).

Tabla 3.25 Ventas de papel del proceso de borra

PROD. PAPEL m ² /AÑO	HOJAS CARTA / m ²	PROD. HOJAS/AÑO	PAQUETES 100 HOJAS/ AÑO	\$/ PAQUETE	VENTA TOTAL	IMPUESTOS
627,045.12	16	10,032,721.92	100,327.22	\$525.00	\$52,671,790.08	\$8,427,486.41

Existen indicadores para la determinación de la viabilidad de cada proyecto, uno de ellos es el retorno de la inversión (ROI), este indicador expresa la relación entre las ganancias obtenidas y los recursos invertidos, mostrando qué tan rentable resulta una inversión en términos porcentuales. Este indicador se calcula con la ecuación 3.1

$$ROI = \frac{P}{I} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde P es la ganancia anual neta que se calcula con la ecuación 3.2 y la I es la inversión inicial que contempla el gasto de los equipos de proceso como los de laboratorio, estos últimos son prorrateados entre las 3 líneas de producción.

$$P = R - eI - t(R - dI) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Sustituyendo los valores del proceso de borra de café se tiene la ecuación 3.3.

$$P = \$4,610,898.67 - \$1,989,023.60 * (0.1 - 0.16) * (\$4,610,898.67 - 0.1 * \$1,989,023.60) = \$3,706,076.90 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 3.1 se tiene la ecuación 3.4

$$ROI = \frac{\$3,706,076.90}{\$1,989,023.60} = 1.86 \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Un ROI positivo y mayor a 1 refleja que la inversión genera beneficios, mientras que un ROI menor a 1 indica que los retornos no son suficientes para recuperar la inversión realizada. El ROI de 1.86 indica que por cada unidad monetaria invertida en el proyecto se generan 1.86 unidades monetarias adicionales como ganancia este valor refleja que el proyecto es financieramente viable y altamente rentable.

Otro indicador para evaluar el potencial económico de un proyecto es con el tiempo de recuperación de capital (TIR), este representa el tiempo que tardaría el inversionista en recuperar todo su capitán en el caso hipotético de que todas las utilidades se usaran exclusivamente con este fin y se calcula con la ecuación 3.5

$$TIR = \frac{I}{P + eI} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Aplicando los valores del proyecto a la ecuación 3.5 se obtiene la ecuación 3.6, misma que arroja un TIR de 0.50, lo que significa que la inversión se recuperaría en medio año.

$$TIR = \frac{\$1,989,023.60}{\$3,706,076.90 + (0.12 * \$1,989,023.60)} = 0.50 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Ambos indicadores demuestran la viabilidad del proceso considerando la venta total del producto, cabe mencionar que el papel artesanal es competitivo en el mercado ya que papeles similares rondan en \$400.00 (Cuatrocientos pesos 00/100 MXN) 50 hojas de papel (Amazon, 2025).

- b) Costos de cascarilla de café: En la producción de la cascarilla de café se omite el proceso de lavado, para la misma producción que se seleccionó, esto ocasiona que el costo por consumo energético se reduzca al año (Tabla 3.26) y la inversión inicial, al no necesitar el equipo para el lavado se reduce a \$1,677,023.60 (Un millón seiscientos setenta y siete mil veintitrés pesos 60/100 MXN)

Tabla 3.26 Consumo energético proceso de cascarilla de café

EQUIPO	CONSUMO kW/h	HORAS DE OPERACIÓN AL DIA	CONSUMO TOTAL AL DIA kW/h	CONSUMO kW/MES	CONSUMO O kW/AÑO	COSTO ANUAL
Bascula	0.002	2.00	0.00	0.10	1.15	\$ 3.29
Molino	0.75	15.00	11.25	270.00	3240.00	\$ 9,263.16
Reactor Kraft	0.56	5.00	2.80	67.20	806.40	\$ 2,305.50
Tanque blanqueo	3.00	24.00	72.00	1728.00	20736.00	\$ 59,284.22
Tanque lavado	0.70	20.00	14.00	336.00	4032.00	\$ 11,527.49
máquina Fourdrinier	1.10	24.00	26.40	633.60	7603.20	\$ 21,737.55
Total			126.45	3034.90	36418.75	\$ 104,121.21

Para el caso de los insumos, el costo asciende hasta \$20,210,590.01 (Veinte millones doscientos diez mil quinientos noventa pesos 01/100 MXN) (Tabla 3.27) en comparación con la borra de café, esto se debe a la proporción de material con el que se preparan las hojas de papel (Tabla 3.16)

Tabla 3.27 Insumos de producción de papel con cascarilla de café

MATERIAL	CANTIDAD /DIA	PRECIO UNITARIO	COSTO DIARIO	COSTO MENSUAL	COSTO ANUAL
Agua uso industrial (L)	1443.182	\$1.00	\$1,443.18	\$28,863.63	\$346,363.56
NaOH (kg)	43.893	\$99.75	\$4,378.34	\$87,566.85	\$1,050,802.21
Na ₂ S (kg)	1.568	\$5.50	\$8.63	\$172.55	\$2,070.64
H ₂ O ₂ (L)	1567.613	\$50.00	\$78,380.64	\$1,567,612.80	\$18,811,353.60
Total					\$20,210,590.01

Final mente se hace el resumen de costos de la tabla 3.28 para el cálculo de los indicadores de viabilidad.

En este caso el costo total de producción es de \$45,995,166.86 (Cuarenta y cinco millones novecientos noventa y cinco mil ciento sesenta y seis pesos 86/100 MXN) anuales, lo que lo vuelve más económico que el proceso de la borra de café, aunque el gasto de insumos sea mayor.

Tabla 3.28 Costos de producción de papel con cascarilla de café

CLASIFICACIÓN	CONCEPTO	\$/año	\$/kg
Fabricación	Materias primas	\$351,483.49	\$1.56
	Insumos de proceso	\$20,210,590.01	\$89.53
	Reactivos para laboratorio	\$459,099.71	\$2.03
	Mano de obra de la operación (Operadores)	\$882,000.00	\$3.91
	mano de obra de obra analistas	\$188,400.00	\$0.83
	Mano de obra oficia, almacén y limpieza	\$444,812.00	\$1.97
Servicios	Mano de obra supervisores	\$177,000.00	\$0.78
	Electricidad (\$/kWh)	\$104,879.09	\$0.46
	Manejo de desechos (\$/kg)	\$9,029,449.73	\$40.00
	Mantenimiento y reparaciones (2-10% del capital fijo)	\$117,391.65	\$0.52
	Suministros de operación (10-20% de MyR)	\$17,608.75	\$0.08
	Cargos de laboratorio (10-20% de mano de obra de operación)	\$132,300.00	\$0.59
	Patentes y derechos (0.5% del gasto total)	\$228,831.68	\$1.01
Total (Costos directos de operación)		\$32,343,846.12	\$143.28
Indirectos	Generales (Nomina y planta, empackado, almacenamiento, (50-70% de la suma de mano de obra de operación, supervisión y mantenimiento)	\$1,015,327.20	\$4.50
	Impuestos locales (1-2% del capital fijo)	\$25,155.35	\$0.11
	Seguro (0.4-1% del capital fijo)	\$10,062.14	\$0.04
	Renta	\$600,000.00	\$2.66
Total, costos indirectos		\$1,650,544.70	\$7.31
Generales	Depreciación (10% del capital fijo)	\$167,702.36	\$0.74
	Costos administrativos	\$2,958,268.42	\$13.10
	Distribución y costos de venta	\$3,549,922.11	\$15.73
	Investigación y desarrollo	\$5,324,883.16	\$23.59
Total, de generales		\$11,833,073.69	\$52.42
Costo total de producción		\$45,995,166.86	\$203.76

Para el cálculo de los indicadores de viabilidad del proyecto se sustituyen los valores correspondientes en la en la ecuación 3.1 teniendo así la ecuación 3.7.

$$P = \$6,676,623.22 - \$1,677,023.60 * (0.1 - 0.16) * (\$6,676,623.22 - 0.1 * \$1,677,023.60) = \$5,467,493.52 \text{ (Ec. 3.7)}$$

Sustituyendo el valor P de la ecuación 3.7 se sustituye en la ecuación 3.2, con lo que se tiene la ecuación 3.8 arrojando un ROI de 3.26.

$$ROI = \frac{\$5,467,493.52}{\$1,677,023.60} = 3.26 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Y para el cálculo del TIR se utiliza nuevamente la ecuación 3.5 y se sustituyen valores, teniendo la ecuación 3.9, misma que arroja un valor de TIR de 0.29 lo que indica que en 3 meses se estaría recuperando la inversión.

$$TIR = \frac{\$1,677,023.60}{\$5,467,493.52 + (0.12 * \$1,677,023.60)} = 0.29 \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Estos valores de ROI y TIR indican la viabilidad del proceso al tener una ganancia de 3.26 pesos por cada peso invertido y el tiempo de recuperación de la inversión es de casi tres meses, en comparación con el proceso de la borra, considerando las mismas condiciones, es mucho más rentable.

- c) Costos de pulpa de café: En la línea de producción de papel con pulpa de café, se considera el mismo consumo energético que de borra de café (Tabla 3.22), ya que las necesidades del proceso son similares y se ocupan los mismos equipos, sin embargo, los insumos de producción se enlistan en la tabla 3.29, estos costos son aún mayores que el de los dos procesos anteriores, subiendo hasta \$26,258,600.27 (Veintiséis millones doscientos cincuenta y ocho mil seiscientos pesos 27/100 MXN).

Tabla 3.29 Insumos de producción de papel con pulpa de café

ATERIAL	CANTIDAD /DIA	PRECIO UNITARIO	COSTO DIARIO	COSTO MENSUAL	COSTO ANUAL
Agua uso industrial (L)	1L	\$1.00	\$4,029.74	\$96,713.82	\$1,160,565.88
NaOH (kg)	1kg	\$99.75	\$8,756.69	\$210,160.44	\$2,521,925.31
Na ₂ S (kg)	1kg	\$5.50	\$8.63	\$207.06	\$2,484.76
H ₂ O ₂ (L)	1L	\$50.00	\$78,380.64	\$1,881,135.36	\$22,573,624.32
Total					\$26,258,600.27

Se realizó el resumen económico correspondiente a este proceso (Tabla 3.30) con las modificaciones en materia prima, insumos de proceso, reactivos de laboratorio y consumo eléctrico.

Tabla 3.30 Costos de producción de papel con pulpa de café

CLASIFICACIÓN	CONCEPTO	\$/año	\$/kg
Fabricación	Materias primas	\$351,483.49	\$1.56
	Insumos de proceso	\$26,258,600.27	\$116.32
	Reactivos para laboratorio	\$459,099.71	\$2.03
	Mano de obra de la operación (Operadores)	\$882,000.00	\$3.91
	mano de obra de obra analistas	\$188,400.00	\$0.83
	Mano de obra oficia, almacén y limpieza	\$444,812.00	\$1.97
Servicios	Mano de obra supervisores	\$177,000.00	\$0.78
	Electricidad (\$/kWh)	\$116,406.58	\$0.52
	Manejo de desechos (\$/kg)	\$9,029,449.73	\$40.00
	Mantenimiento y reparaciones (2-10% del capital fijo)	\$139,231.65	\$0.62
	Suministros de operación (10-20% de MyR)	\$20,884.75	\$0.09
	Cargos de laboratorio (10-20% de mano de obra de operación)	\$132,300.00	\$0.59
	Patentes y derechos (0.5% del gasto total)	\$259,443.70	\$1.15
Total (Costos directos de operación)		\$38,459,111.90	\$170.37
Indirectos	Generales (Nomina y planta, empackado, almacenamiento, (50-70% de la suma de mano de obra de operación, supervisión y mantenimiento)	\$1,015,327.20	\$4.50
	Impuestos locales (1-2% del capital fijo)	\$29,835.35	\$0.13
	Seguro (0.4-1% del capital fijo)	\$11,934.14	\$0.05
	Renta	\$600,000.00	\$2.66
Total, costos indirectos		\$1,657,096.70	\$7.34
Generales	Depreciación (10% del capital fijo)	\$198,902.36	\$0.88
	Costos administrativos	\$2,958,268.42	\$13.10
	Distribución y costos de venta	\$3,549,922.11	\$15.73
	Investigación y desarrollo	\$5,324,883.16	\$23.59
Total, de generales		\$11,833,073.69	\$52.42
Costo total de producción		\$52,148,184.64	\$231.01

Aplicando la ecuación 3.1 donde se sustituyen los valores de este proceso, se obtiene la ecuación 3.10 con un valor P de \$272,750.59 (Doscientos setenta y dos mil setecientos cincuenta pesos 59/100 MXN)

$$P = \$523,605.44 - \$1,989,023.60 * (0.1 - 0.16) * (\$523,605.44 - 0.1 * \$1,989,023.60) = \$272,750.59 \text{ Ec.3.10}$$

Con este dato se obtiene el ROI de 0.13 (Ecuación 3.11) lo que lo vuelve el proceso menos rentable en comparación con la borra y la cascarilla.

$$ROI = \frac{\$272,750.59}{\$1,989,023.60} = 0.13 \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Además, el valor de la TIR es de 3.88 (Ecuación 3.12) lo que indica que en comparación con la producción de papel con borra de café y de cascarilla es más lento el retorno de la inversión, debido a los gastos de producción, considerando el mismo precio de venta para los paquetes de 100 hojas de papel de cada proceso.

$$TIR = \frac{\$1,989,023.60}{\$272,750.59 + (0.12 * \$1,989,023.6)} = 3.88 \quad (\text{Ec. 3.12})$$

En conjunto, los valores de TIR y ROI de todas las líneas de producción sugieren que el proyecto es económicamente atractivo, con un rendimiento anual sólido.

3.7.3 Análisis de impacto ambiental

Como parte de la evaluación se realizó análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso, para ello se determina la unidad funcional, misma que se determinó como la elaboración de 1 m² de papel artesanal de 300 g/m² con papel reciclado y celulosa a partir de residuos de café.

Inicialmente se realizó un inventario de los reactivos utilizados en la producción del papel reciclado (Tabla 3.31) para la unidad funcional y con ello se realizó un balance de materia y energía con respecto a las entradas y salidas del proceso.

Esta información es necesaria para llenar el sistema SIMAPRO que es el software que analiza el ciclo de vida, este se alimenta como le ilustra en la figura 3.50 con los datos del inventario y este hace estimaciones según las cantidades de todo lo que se ve involucrado en el proceso.

Tabla 3.31 Inventario para análisis de ciclo de vida

PARÁMETRO	REACTIVO	CANTIDAD	UNIDAD
Lavado	Muestra	0.065	kg
	H ₂ O	0.13	kg
Secado	ES	11040	W/m ²
Molienda	EE	750	W
Pulpeo	H ₂ O	0.65	kg
	Papel	0.06	kg
Extracción kraft	Na ₂ S	0.0055	kg
	NaOH	0.208	kg
	H ₂ O	0.6	kg
Blanqueo de papel	H ₂ O ₂	0.29	kg
	NaOH	0.025	kg
	Na ₂ SiO ₃	0.48	kg
	H ₂ O	0.3	kg
	Na ₂ CO ₃	0.03	kg
Blanqueo celuloso	NaClO	0.8325	kg
	H ₂ O	0.25	kg

La información fue estructurada conforme a los requerimientos del software, asegurando la coherencia entre los inventarios, las unidades y las categorías de impacto ambiental seleccionadas.

Producción						
Salidas conocidas a la tecnología. Productos y co-productos	Cantidad	Ud.	Distribución	Tipo de resid.	Asignación	Categoría
Papel Artesanal	1	m2	Area	no definido	100 %	Paper + Bo...
Entradas						
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)	Subcompartimento	Cantidad	Ud.	Distribución	DS*2 or 2*DS	Máx
Water, fresh	(unspecified)	0.001080	m3	Indefinido		
Energy, solar, converted	(unspecified)	11040	Wh	Indefinido		
Entradas conocidas desde la tecnología (materiales/combustibles)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS*2 or 2*DS	Máx
Water, ultrapure (CA-QC) water production, ultrapure (Cut-off, U		0.92	kg	Indefinido		
Sodium hydroxide, production mix, at plant (US) Chlorine, production ...		0.233	kg	Indefinido		
Hydrogen peroxide mix, anthraquinone process, at producer, 50% active ...		0.29	kg	Indefinido		
Natural soda ash (Sodium carbonate), at plant (US) Natural soda ash (S...		0.03	kg	Indefinido		
Sodium hypochlorite/REB		0.8325	kg	Indefinido		
Sodium sulfite (DE) resorcinol production, benzene disulfonation (Cut-o...		0.0055	kg	Indefinido		
Sodium silicate, solid (RoW) market for sodium silicate, solid (Cut-off, U		0.48	kg	Indefinido		
Ethanol, denatured, mixed feedstocks, at conversion facility (RNA) Eth...		0	kg	Indefinido		
Toluene, at plant (RNA) Toluene, at plant		0	kg	Indefinido		
Entradas conocidas desde la tecnología (electricidad/calor)		Cantidad	Ud.	Distribución	DS*2 or 2*DS	Máx

Figura 3.50 Vaciado de datos al SIMAPRO

Una vez completada la carga de datos requerida por el software, el sistema procedió a ejecutar el análisis de impacto ambiental, lo que permitió desglosar y cuantificar los efectos ambientales asociados a cada paso unitario y a cada insumo químico involucrado.

El software identificó categorías de impacto relevantes, como el potencial de calentamiento global, la eutrofización y la acidificación, etc y asignó valores específicos a cada componente del proceso, facilitando así la visualización de los puntos críticos y la priorización de estrategias de mitigación.

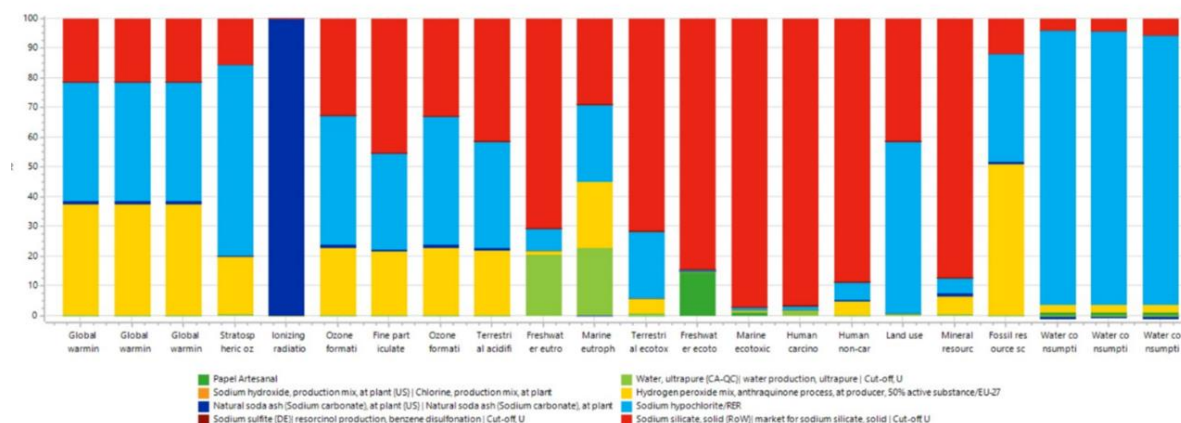


Figura 3.51 Gráfico de caracterización emitido por SIMAPRO

Parte de la información que otorga el software es la figura 3.51, donde grafica el impacto del proceso de producción de papel artesanal, resaltando categorías como el calentamiento global, agotamiento de los recursos fósiles y consumo de agua, el uso de sustancias químicas como sulfito de sodio y silicato de sodio que contribuye significativamente.

A pesar de que la producción de papel artesanal tiene una huella ambiental significativamente más pequeña que el uso de otras entradas químicas en varias categorías, como la ionización de la radiación y la formación de ozono troposférico, los impactos permanecen en las categorías relacionadas con el uso intensivo de recursos y emisiones a largo plazo.

Además, el análisis de la figura 3.52 revela que el impacto más significativo del proceso de producción recae en la salud humana, representado casi en su totalidad por las emisiones asociadas al proceso del propio papel artesanal. En cuanto a la afectación de ecosistemas y recursos, los resultados muestran una contribución más balanceada, donde sustancias como el carbonato de sodio, silicato de sodio y el sulfito de sodio juegan un papel importante en la generación de impactos ambientales.

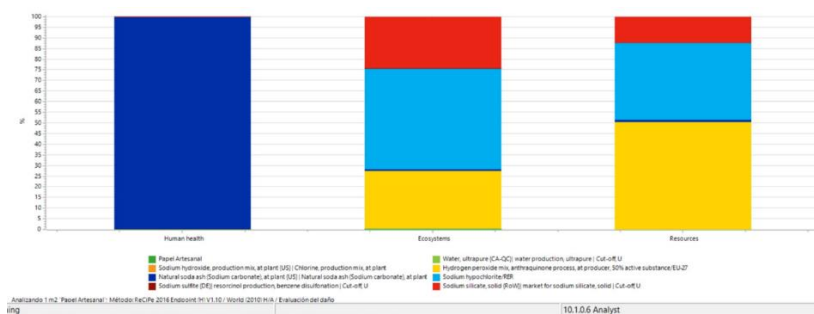


Figura 3.52 Gráfico de evaluación del daño emitido por SIMAPRO

En comparación, las afectaciones a ecosistemas y recursos resultaron ser prácticamente insignificantes, lo que indica que las emisiones y cargas ambientales derivadas del proceso analizado tienen un efecto predominantemente en la calidad de vida y la salud de las personas. Con respecto a las sustancias, el mayor impacto es debido al uso del silicato de sodio en el blanqueo de las fibras de papel figura 3.53, por ello se sustituyó este reactivo por peróxido de hidrogeno.

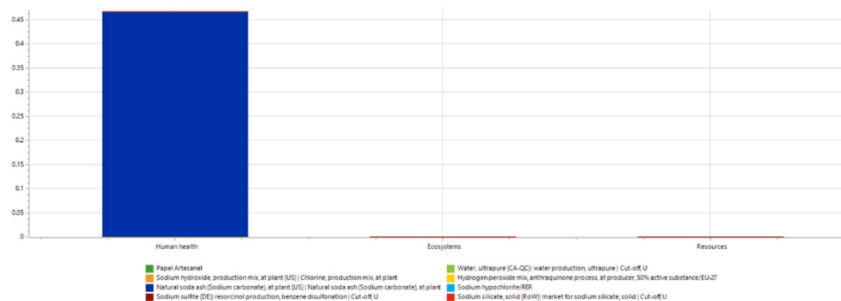


Figura 3.53 Gráfico de Normalización emitido por SIMAPRO

Si bien, ya es un proceso alternativo al no utilizar materias primas vírgenes, estos resultados destacan la necesidad de optimizar el uso de químicos y buscar alternativas más sostenibles dentro del proceso de fabricación para reducir aún más los impactos ambientales.

3.8 TRATAMIENTO DE RESIDUOS

Los residuos generados durante el proceso de producción son tanto residuos sólidos, líquidos y gaseosos, cuya gestión adecuada fue fundamental para garantizar la sostenibilidad del sistema.

Residuos de papel no aptos para reciclaje: Estos residuos fueron separados para su disposición final.

Residuos de café: Estos residuos fueron dispuestos a compostaje para convertirse en abono orgánico para utilizarse como fertilizante en la agricultura o en jardinería.

Aguas residuales: Inicialmente en el proceso de lavado se generaron 20 L de agua contaminada, con azúcares y café, para este tipo de residuos se propuso un segundo uso en el que el agua residual de la pulpa de café puede ser utilizada para la producción de licores y fermentados, debido al contenido de azúcares que esta tiene, manteniendo condiciones necesarias de limpieza e inocuidad para poder consumirse, otra opción es el reúso dentro del mismo lavado o finalmente para riego.

Para los residuos de las pruebas de caracterización, por sus características propias, se neutralizaron y fueron puestas a disposición para su confinamiento, y por otro lado los generados por el proceso de extracción Kraft tienen un alto contenido de compuestos orgánicos con pH alcalino, este lixiviado puede reincorporarse al proceso de producción, sin embargo también se sugirió su uso para compostaje considerando su neutralización previa y finalmente secarlo al ambiente para la reducción de volumen y su posterior disposición a confinamiento.

CONCLUSIONES

La sostenibilidad en la industria cafetalera y papelera se presenta como una necesidad urgente frente a los retos ambientales. La gestión adecuada de los residuos generados, tanto de café como de papel, no solo mitiga su impacto negativo, sino que también abre las puertas a innovación en la producción de papel reciclado a partir de materiales alternativos como la celulosa de los residuos de café.

Al implementar este proceso se le da una segunda oportunidad a los residuos tanto de la industria papelera como cafetalera, reduce costos de producción por el uso de materias primas e inspira a la toma de decisiones para implementar la economía circular de los procesos industriales.

El análisis de los residuos de café provenientes de la cafetalera “La ilusión” ha revelado importantes diferencias en su comportamiento térmico y composición química, lo que sugiere su potencial aplicación en diversas áreas como biofiltros, combustibles, industria de alimentos y en este caso para su aprovechamiento como fuente de celulosa para papel.

El proceso permitió demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental de un proceso sostenible para la elaboración de papel reciclado adicionado con celulosa extraída de residuos de café.

Los resultados obtenidos durante la caracterización fisicoquímica de la borra, pulpa y cascarilla evidenciaron que estos residuos contienen porcentajes significativos de celulosa, así como estructuras lignocelulósicas compatibles con procesos convencionales de extracción, lo que confirma su potencial como materia prima alterna para la industria papelera.

El proceso de extracción Kraft aplicado a los residuos de café permitió aislar fibras con una reducción efectiva de lignina y compuestos no celulósicos, generando pulpas con características aptas para su incorporación a formulaciones de papel reciclado.

El proceso de formación de hojas evidenció que las pulpas provenientes de café presentan niveles de retención y acoplamiento satisfactorios cuando se combinan con fibras de papel reciclado.

Las evaluaciones de gramaje, espesor, humedad, tensión, rasgado y encolado mostraron que las formulaciones obtenidas cumplen o se aproximan a los límites establecidos en la NMX-N-107-SCFI-2010, lo que demuestra que este material puede emplearse en aplicaciones similares a las del papel convencional con un desempeño técnico adecuado.

El análisis económico realizado confirmó que la sustitución parcial de fibras vírgenes por celulosa procedente de residuos de café reduce significativamente los costos asociados a la materia prima y a la gestión de residuos agroindustriales.

Asimismo, la evaluación ambiental, mediante SIMAPRO, mostró una disminución notable en impactos como huella de carbono, uso de agua y generación de residuos sólidos en comparación con procesos tradicionales. Esta reducción se relaciona directamente con la valorización de desechos que comúnmente son subutilizados o dispuestos inadecuadamente.

En conjunto, los resultados permiten concluir que la integración de celulosa obtenida de residuos de café en la producción de papel reciclado es una alternativa sostenible, eficiente y técnicamente viable, que contribuye simultáneamente a la economía circular, a la disminución de la demanda de fibra virgen y a la reducción de impactos ambientales asociados tanto a la industria papelera como a la cafetalera.

El proceso desarrollado constituye una base sólida para el escalamiento industrial y abre la puerta a nuevas líneas de investigación enfocadas en mejorar las propiedades del papel, optimizar las condiciones del proceso y ampliar el aprovechamiento integral de los residuos de café.

RECOMENDACIONES

Para fortalecer y ampliar el alcance de los resultados obtenidos en esta investigación, se propone que para la optimización del proceso de extracción se podrían evaluar diferentes presiones con el uso de equipos y la evaluación de la calidad del agua con la que se realiza la extracción para mejorar el rendimiento y la pureza de la celulosa obtenida. Considerar el uso del licor negro y otros subproductos para producir bioenergía, compost o sustancias químicas de valor agregado para evaluar el potencial de la lignina obtenida como fuente para resinas, bioplásticos u otros materiales.

Probar diferentes proporciones de fibras de café como composito de todos los residuos y no por separado para ajustar propiedades como resistencia mecánica, flexibilidad o capacidad de absorción, además de la Incorporación de aditivos biodegradables o naturales que mejoren el desempeño sin comprometer la sostenibilidad del producto.

Realizar estudios piloto que permitan validar los resultados a mayor escala, considerando variables de control industrial la integración del proceso en pequeñas y medianas empresas de producción de papel o cooperativas cafetaleras.

Además, se sugiere la incorporación de más pruebas de calidad como de envejecimiento, resistencia a la humedad, estabilidad dimensional y análisis ópticos para caracterizar de manera más completa el papel obtenido y comparar directamente las formulaciones con papeles comerciales para identificar áreas de mejora. Incluir indicadores sociales que permitan valorar el impacto del proyecto en comunidades cafetaleras, Ampliar el análisis del ciclo de vida del producto final considerando escenarios de disposición y reciclaje. Promover alianzas con instituciones académicas, empresas y productores de café para fomentar la adopción del proceso y el desarrollo de manuales o guías prácticas que faciliten la implementación del método en contextos reales.

REFERENCIAS

1. Aguilar, N., Houbron, E., Rustrian, E., Reyes, L. (2014) Papel amate de pulpa de café (coffea arabica) (residuo de beneficio húmedo). Universidad Autónoma Indígena de México Mochicahui. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46131111008>
2. Agronews Castilla y León. (2026, 8 de enero). El café alcanza su precio más alto en casi 50 años tras un aumento del 14 % en febrero. Agronews Castilla y León. <https://www.agronewscastillayleon.com/precio-del-cafe/>
3. Abolore, R. S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). Green and sustainable pretreatment methods for cellulose extraction from lignocellulosic biomass and its applications: A review. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 7, Article 100396. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2023.100396>
4. Amazon. (2025). Papel mixto – papel hecho a mano cubierta [Producto]. <https://www.amazon.com.mx/Papel-mixto-papel-hecho-cubierta/dp/B0CBGG9QHW>
5. Berrios Luzarazu Pablo (2016). Uso adecuado de hojas de papel para el cuidado del medio ambiente. Ministerio de Obras Públicas, Servicios y Vivienda, Unidad Ejecutora de Titulación.
6. Charles Comercializadora Potosina del Centro (2025). Molino eléctrico Charles Salsero 1 HP nixtamal 60 kg/h. Mercado Libre México. <https://www.mercadolibre.com.mx/molino-electrico-charles-salsero-1-hp-nixtamal-60-kgh/up/MLMU696455398>
7. Cifuentes Alfonso, M. L. (2023). Comparación de la composición química de la pulpa de café a dos altitudes de siembra en la Región Occidental de Guatemala para uso en la fabricación de papel (Trabajo de grado, Universidad del Valle de Guatemala). Repositorio Institucional UVG. <https://repositorio.uvg.edu.gt/handle/123456789/5836>

8. Cogua, H. R. (2019). Estudio de la borra de café para su uso en formulaciones de liberación controlada de nutrientes. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76039>
9. Colín Urieta, S. (2008). Composición química de la madera de dos especies *Cordia elaeagnoides* DC y *Pithecellobium acatlense* Benth [Tesis de maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera.
10. Dirección General de Normas. (1982). NOM-N-60-C-1982: Industrias de la celulosa y del papel – Determinación del índice de tracción. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
11. Dhia, M. (2021). Estudio de fuentes alternativas a la madera para la obtención de celulosa.
12. Durán, J., Gordillo, G.(2011) Caracterización química y estudio del proceso de gasificación y pirolisis de la pulpa de café. Universidad de los Andes Bogotá, Colombia.
13. Erick, R. U. (2014). Determinación de los principales componentes de la biomasa lignocelulosica; celulosa, hemicelulosa y lignina de la paja de trigo para su posterior pretratamiento biológico. In Actas del XVII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas Agricultura sustentable: Uso eficiente del agua, suelo y fertilizantes, Mexicali, México (Vol. 9, pp. 114-118).
14. Espinosa-García, J. A., Martínez-Moreno, J. I., Peña-Valdivia, C. B., Gómez-Merino, F. C., & Salgado-García, S. (2016). Productividad y rentabilidad potencial del café (*Coffea arabica* L.) en el trópico mexicano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 7(8), 2011–2025. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342016000802011

15. FAOSTAT. 2022. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>

16. Faria, L. U. S., Pacheco, B. J. S., Oliveira, G. C., & Silva, J. L. (2020). Production of cellulose nanocrystals from pineapple crown fibers through alkaline pretreatment and acid hydrolysis under different conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 12346–12353. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.093>

17. Fierro-Cabrales, N., Contreras-Oliva, A., González-Ríos, O., Rosas-Mendoza, E. S., & Morales-Ramos, V. (2018). Caracterización química y nutricional de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.). *AGRO Productividad*.

18. Figueroa-Hernández, Esther, Pérez-Soto, Francisco, Godínez-Montoya, Lucila, & Perez-Figueroa, Rebeca Alejandra. (2019). Los precios de café en la producción y las exportaciones a nivel mundial. *Revista mexicana de economía y finanzas*, 14(1), 41-56. <https://doi.org/10.21919/remef.v14i1.358>

19. Franco, J., Urdaneta, F., Córdoba, Y., Meza, L., Urdaneta, I., Jameel, H., & González, R. W. (2025). Assessing bleached bamboo fibers as a hardwood replacement via kraft co-cooking for paperboard applications. *Industrial Crops and Products*, 232, 121252. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121252>

20. Food machine manufacturer (2025). China double-layer chemical reaction kettle (jacketed stainless-steel reactor). Made-in-China.com. https://shanghaikexing.en.made-in-china.com/product/yTmUxcSKgapP/China-Double-Layer-Chemical-Reaction-Kettle-Polymerization-Jacketed-Stainless-SteelReactor.html?ads_tp=ppc&ads_id=snrxJzUEBQWX&header_search_page=lv&p_v_id=1ja7pcfmo596&faw_id=1ja7peag637c&bv_id=1ja7peaga842&pbv_id=1ja7pcdkpf8eq

21. FOSS. (2025). Soxtec 8000. FOSS. <https://www.fossanalytics.com/products/soxtec-8000?creative=590451299902&keyword=soxhlet&matchtype=p&network=g&device=c>

29. Gutiérrez, A., del Río, J. C., Martínez, M. J., & Martínez, A. T. (2001). The biotechnological control of pitch in paper pulp manufacturing. *Trends in Biotechnology*, 19(9), 340-348. [https://doi.org/10.1016/S0167-7799\(01\)01705-X](https://doi.org/10.1016/S0167-7799(01)01705-X)
30. Hernández-Varela, J. D., & Medina, D. I. (2023). Revalorization of coffee residues: Advances in the development of eco-friendly biobased potential food packaging. *Polymers*, 15(13), 2823. <https://doi.org/10.3390/polym15132823>
31. IDM Test. (2025). Universal micrometer (MU) – 25-0,001 mm. <https://www.idmtest.com/products/universal-micrometer-25-0-001-mm-idm>
32. Inmuebles24. (2025). Renta, Bodega, San Mateo Atenco [Anuncio de bodega en renta]. Inmuebles24. <https://www.inmuebles24.com/propiedades/clasificado/alclbcin-renta-bodega-san-mateo-atenco-146478857.html>
33. Instituto del Café de Chiapas. (2025). Datos del café. <https://incafech.gob.mx/assets/media/documentos/Datos%20cafe.pdf>
34. Jacobo, N. M. G. (2025). Producción de papel ecológico a partir de celulosa extraída de papel reciclado y cáscara de naranja. *Ciencia y Educación*, 6(7.1), 147–157. <https://www.cienciayeducacion.com/index.php/journal/article/view/1659>
35. Janissen, B., & Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 128, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.001>
36. Kexing (2025). 1.5T Sink Floating Washing Cleaning. https://www.alibaba.com/product-detail/1-5T-Sink-Floating-Washing-Cleaning_1601360344282.html
37. Laboteca. (2025.). MS-H-S Termoagitador magnético análogo. <https://www.laboteca.com.mx/products/termoagitador-magnetico-analogo>

38. Laboteca. (2025). Horno para secar. Laboteca. <https://www.laboteca.com.mx/products/horno-para-secar>
39. Laboteca. (2025). Bomba de vacío Rocker 300. <https://www.laboteca.com.mx/products/bomba-de-vacio-rocker-300>
40. Laboteca. (2025). Mufla. Laboteca. <https://www.laboteca.com.mx/products/mufla>
41. López-Escobar, L. A., Olivo-Alanís, D. S., & Nava-Valente, N. (2025). Subproductos del café (Coffea): desafíos ambientales y oportunidades para la bioeconomía. Tendencias en Energías Renovables y Sustentabilidad, 4(1), 45–49. <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.422>
42. Lund, K., Sjöström, K., & Brelid, H. (2012). Alkali extraction of kraft pulp fibers: Influence on fiber and fluff pulp properties. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 7(2), 30-39. <https://doi.org/10.1177/155892501200700206>
43. Magina, S., Marques, S., Gírio, F., Lourenço, A., Barros-Timmons, A., & Evtuguin, D. V. (2024). Chemical composition and structural features of cellolignin from steam explosion followed by enzymatic hydrolysis of Eucalyptus globulus bark. Industrial Crops And Products, 211, 118217. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118217>
44. Manals-Cutiño, E., Penedo-Medina, M., & Giralt-Ortega, G. (2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. Tecnología Química, XXXI (2), 36-43.
45. Madroñero Palacios, S., & Guzmán-Hernández, T. (2018). Desarrollo sostenible. Aplicabilidad y sus tendencias. Revista Tecnología En Marcha, 31(3), pág. 122–130. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i3.3907>
46. Mar, P. (2022) Tipos de papel para imprimir. Proprint. <https://www.proprintweb.com/blog/tipos-de-papel-para-imprimir>

47. Makertan, & Makertan. (2023). Proceso de fabricación del papel. La Prestampa. <https://laprestampa.com/el-proceso-grafico/materiales-productos-y-soportes/fabricacion-del-papel/>
48. Madroñero-Palacios, Sandra, & Guzmán-Hernández, Tomás. (2018). Desarrollo sostenible. Aplicabilidad y sus tendencias. Revista Tecnología en Marcha , 31 (3), 122-130. <https://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i3.3907>
49. Md Salim, R., Asik, J. y Sarjadi, MS (2021). Grupos funcionales químicos de extractos, celulosa y lignina extraídos de la corteza de Leucaena leucocephala nativa . Wood Sci Technol 55 , 295–313 <https://doi.org/10.1007/s00226-020-01258-2>
50. Mei, L., Oliveira, N.(2016) Characterization of composite polymeric biodegradable using Poly (ϵ -caprolactone) and coffee grounds.Laboratório de Processamento de Polímeros,Universidade Estadual de Campinas. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2139>
51. Mesumex. (2025). Báscula de plataforma industrial de 1, 2, 3 toneladas – PLA-TN. Mesumex. <https://mesumex.com/products/bascula-de-plataforma-industrial-pla-tn>
52. Morandín Ahuerma, I., Contreras Hernández, A., Ayala Ortiz, D. A., & Pérez Maqueo, O. (2023). La sustentabilidad y la cultura cafetalera mexicana. Madera y Bosques, 29(1), e290120. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712023000100201
53. Morcillo-Bellido, J. (2018). Sostenibilidad en la cadena de suministro: evidencias del sector minorista español. 360 revista de Ciencias de la Gestión, 3, 18-38. <https://doi.org/10.18800/360gestion.201803.001>
54. Mués C. Federico; Rodríguez, María Elvira; Tucci, Víctor; Rodríguez, María Analía (2021). Celulosa para papel - análisis de los costos de producción de pulpa de celulosa:

métodos kraft - Studocu. <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-de-guadalajara/celulosa-y-papel/celulosa-para-papel/33085315>

55. Mues, F., Rolón, J. N., & Rodriguez, M. E. (2018). Determinación de Costos para la Producción de Celulosa mediante Método Kraft y Mecánico. *Revista Tecnología Y Ciencia*, (32), 307–318. Recuperado a partir de <https://rtyc.utn.edu.ar/index.php/rtyc/article/view/92>
56. Mullen (2025). Mullen-Type Burst Strength Testing. <https://www.worldoftest.com/es/mullen-type-burst-strength-testing>
57. Mussatto, S. I., Ballesteros, L. F., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Extraction of antioxidant phenolic compounds from spent coffee grounds. *Separation and Purification Technology*, 83, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.09.036>
58. Musule, R., Alarcón-Gutiérrez, E., Houbbron, E. P., Bárcenas-Pazos, G. M., Pineda-López, M. del R., Domínguez, Z., & Sánchez-Velásquez, L. R. (2016). Chemical composition of lignocellulosic biomass in the wood of *Abies religiosa* across an altitudinal gradient. *Journal of Wood Science*, 62(6), 537-547. <https://doi.org/10.1007/s10086-016-1585-0>
59. Naciones Unidas. (1987) Informe Brundtland de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo.
60. Navarro, F. (2023) ¿Quién inventó el papel?. Muy interesante. <https://www.muyinteresante.com/historia/61741.html>
61. Nuñez, D. Y. (2021). Evaluación del pretratamiento oxidativo con peróxido de hidrógeno sobre cascarilla de café y bagazo de caña de azúcar a escala de laboratorio, para la producción de bioetanol de segunda generación (Doctoral dissertation, Universidad Santo Tomás).

62. Orlando, G. Q. C. (2011). Estudio de los cambios de fase estructural en el proceso de tostión de granos de café orgánico evaluados por calorimetría diferencial de barrido (DSC) y difracción de rayos X (DRX). <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/handle/123456789/7062>
63. Ostadi Moghadam, M., & Moeenfar, M. (2024). How does particle size of spent coffee ground affect the physicochemical properties of isolated cellulose nanosphere? Results in Chemistry, 10, 101683. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101683>
64. Pabon, M. (2016) Identificación de café (cofea arábica) adulterado con haba (vicia faba) tostada y molida. Universidad de Pamplona. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/1059/1/Pabon_2016_TG.pdf
65. Papelera panamericana (2021) Papel bond: tipos, usos y características. <https://www.distribuidoradepapelenguadalajara.com/papel-bond-tipos-usos-y-caracteristicas>.
66. Pellegrini, N. Reyes, R. (2009) Reciclaje de papel en la Universidad Simón Bolívar. Universidad Simón Bolívar. <https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sciarttext&pid=S1010-29142009000200004>
67. Pereira, P. H. F., Ornaghi Jr., H. L., Arantes, V., & Cioffi, M. O. H. (2021). Effect of chemical treatment of pineapple crown fiber in the production, chemical composition, crystalline structure, thermal stability and thermal degradation kinetic properties of cellulosic materials. Carbohydrate Research, 499, 108227. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2020.108227>
68. Peña, J., Gonzalez, R. (2002) estudio de prefactibilidad para la producción de pulpa para papel aprovechando los desechos del cultivo del plátano en la región del viejo caldas.

69. Pinzón Ruidiaz, D. I., & Rodríguez Jiménez, C. (2022). Diseño conceptual de la extracción de celulosa presente en la borra de café por medio de una digestión Kraft. Universidad De Antioquia-Universidad Nacional Facultad De Ciencias Y Administración Manizales.
70. PROFEDET. (2025). Salario Procuraduría Federal de la Defensa del Trabajo. Gobierno de México. <https://profedet.gob.mx/micrositio/index.php/salario>
71. Rahayu, S., Wirjosentono, B., Oktavia, E., Zuhra, C. F., Piliang, A. F. R., Pasaribu, K. M., Bibina, R. A., Goei, R., Tok, A. I. Y., Dellyansyah, N., Saputra, A. A., & Gea, S. (2024). Improved Mechanical and Thermal Performance of Bacterial Cellulose Paper through Cationic Cassava Starch Addition. South African Journal Of Chemical Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.09.003>
72. Real academia española (RAE) (2014) Celulosa. Real Academia Española. La 23.^a edición <https://dle.rae.es/celulosa>
73. Ravindran, L., Sreekala, M. S., & Thomas, S. (2019). Novel processing parameters for the extraction of cellulose nanofibres (CNF) from environmentally benign pineapple leaf fibres (PALF): Structure-property relationships. International Journal of Biological Macromolecules, 131, 858-870. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.134>
74. Rodríguez, C., Gordillo, G.(2009) Análisis termogravimétrico del bagazo de la caña de azúcar y de la cascarilla de café para la estimación de las constantes cinéticas en los procesos de gasificación. Universidad de los Andes Bogotá, Colombia. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/678b5f05-b605-42e4-983e-3edecbf245ce>
75. Rodríguez Montenegro, I. M. R., & Blandino Nurinda, L. E. (2022). Pulpa de celulosa a partir de cascarilla de café (Coffea arabica) por el método alcalino [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. Repositorio Institucional UNAN-Managua. <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/19546>

76. Rodríguez, N & DaMatta, F. (2007). Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: una visión agrícola y ecofisiológica. *Agronomía Colombiana*, 25 (1), 113-123.
77. Rolón, J., Federico, M. C., Rodríguez, M. E., Tucci, V., & Rodríguez, M. A. (2016). Análisis de los costos de producción de pulpa de celulosa: Métodos kraft y mecánico. *Energía*, 7(8), 1-12.
78. Romero-Uscanga, E., Montero, G., Toscano, L., & Pérez-Pelayo, L. (2014). Determinación de los principales componentes de la biomasa lignocelulósica: celulosa, hemicelulosa y lignina de la paja de trigo para su posterior pretratamiento biológico. Ponencia presentada en el XVII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas: Agricultura sustentable: Uso eficiente del agua, suelo y fertilizantes, Mexicali, Baja California, México.
79. Rullifank, K. F., Roefinal, M. E., Kostanti, M., Sartika, L., & Evelyn, N. (2020). Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. *IOP Conference Series Materials Science And Engineering*, 845(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/845/1/012005>
80. Rycolab.(2025).Rycolab Crush tester. <https://www.rycobel.com/products/crush-tester-1>
81. Sadurní, J. (2022) Cai Lun, el funcionario chino considerado el inventor del papel. *National Geographic*. https://historia.nationalgeographic.com.es/a/cai-lun-funcionario-chino-considerado-inventor-papel_17966
82. Sánchez-Monedero, A., Cañadas, R., Martín-Sampedro, R., Santos, J. I., Eugenio, M. E., & Ibarra, D. (2025). A sustainable valorization approach of Kraft black liquor from *Robinia pseudoacacia* L.: Lignin precipitation followed by green solvents extraction of phenols from delignified liquor. *Journal of Environmental Management*, 391, 126515. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126515>

83. Secretaría de Economía. (2010). NMX-N-107-SCFI-2010: Industrias de celulosa y papel – Contenido mínimo de fibra reciclada de papel para la fabricación de papel periódico, papel para bolsas y envolturas, papel para sacos, cartoncillo, cajas corrugadas y cajas de fibra sólida – Especificaciones, evaluación de la conformidad y eco-etiquetado. Dirección General de Normas.
84. Sewsynker-Sukai, Y., David, A. N., & Gueguim Kana, E. B. (2020). Recent developments in the application of kraft pulping alkaline chemicals for lignocellulosic pretreatment: Potential beneficiation of green liquor dregs waste. *Bioresource Technology*, 306, 123225. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123225>
85. Soyama, H., Hiromori, K., & Shibasaki-Kitakawa, N. (2025). Simultaneous extraction of caffeic acid and production of cellulose microfibrils from coffee grounds using hydrodynamic cavitation in a Venturi tube. *Ultrasonics Sonochemistry*, 118, 107370. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107370>
86. Staff PCM. (2023) Ventajas y características de los rollos bond. <https://www.pcm.com.mx/learning-center/ventajas-y-caracteristicas-de-los-rollos-bond#:~:text=Mientras%20que%20la%20mayor%C3%ADa%20de,25%25%20y%20el%20100%25>
87. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2000). TAPPI – Technical Association for the Pulp, Paper, Packaging and Converting Industry. <https://www.tappi.org/>
88. Testing Machines Inc. (2025). Densímetro para la determinación de la porosidad del papel 58-03. <https://www.directindustry.es/prod/testing-machines-inc/product-55801-452794.html>
89. Terán-Rivera, S. C., Torres-Martínez, B. del M., Torrescano-Urrutia, G. R., Esqueda, M., Sánchez-Escalante, A., & Vargas-Sánchez, R. D. (2023). Residuos del procesamiento

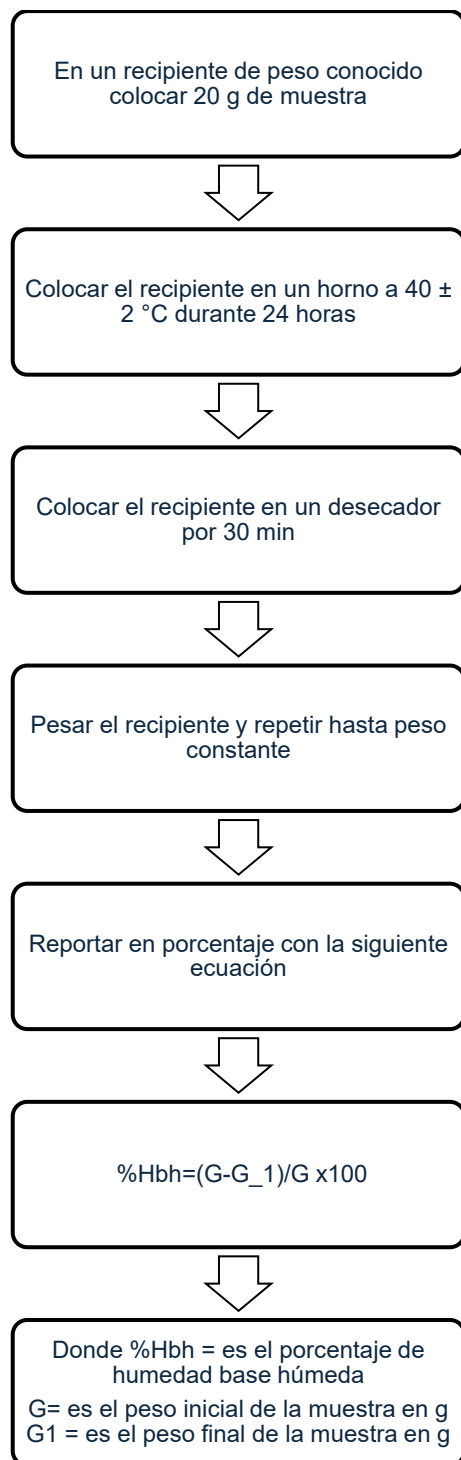
- del fruto de café como fuente natural de antioxidantes para la industria cárnica. TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 26, 1-12.
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2023.540>
90. UD Machine. (2025). Máquina de papel Fourdrinier. <https://ud-machine.com/es/paper-making-machine/fourdrinier-paper/>
91. United Nations. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1). United Nations.
https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf
92. UNEP. (2021). Las emisiones de metano están acelerando el cambio climático. ¿Cómo podemos reducirlas? ONU. Extraído de: <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/las-emisiones-de-metano-estan-acelerando-el-cambio-climatico-como>
93. Vásquez de Díaz, M. C., López, A., Fuentes, B., & Cote, E. (2010). Aceleración del proceso de compostaje de residuos post-cosecha (pulpa) del café con la aplicación de microorganismos nativos. Revista CENIC. Ciencias Biológicas, 41(Esp.), 9–16.
<https://www.redalyc.org/pdf/1812/181220509002.pdf>
94. Vega Ramírez, C. A. (2004). Extracción de fibra corta de alfa-celulosa a partir de la borra del café.
95. Vera, C y Gabriela A. (2024). Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del papel kraft obtenido a partir de la biomasa lignocelulósica de la cascarilla de cacao (Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). Repositorio ESPOCH.
<https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/12686d62-bc85-4ef0-a787-ea3f2d953e6c>
96. Villa G., AM, (2006). Caracterización diamétrica de las especies maderables en bosques primarios del Cerro Murrucucú. Gestión y Ambiente, 9 (2), 73-90.

97. Weshine Machinery Co., Ltd. (2025, abril 17). Are fruit and vegetable cleaning machines worth buying? Read this to understand. Weshinegroup. <https://www.weshinegroup.com/are-fruit-and-vegetable-cleaning-machines-worth-buying-read-this-to-understand/>
98. Wise, L. E., & Murphy, A. D. (1946). Chlorite holocellulose: Its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on hemicelluloses. *Paper Trade Journal*, 122, 35–42.
99. Yuan, Z., Kapu, N. S., Beatson, R., Chang, X. F., & Martinez, D. M. (2016). Effect of alkaline pre-extraction of hemicelluloses and silica on kraft pulping of bamboo (*Neosinocalamus affinis* Keng). *Industrial Crops and Products*, 91, 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.06.019>
100. Zanuttini, M., Antúnez, C., Clemente, A., Torres, A. L., Ferreira, P., & Mochiutti, P. (2008). Propiedades del papel. *Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica*, 235-275.

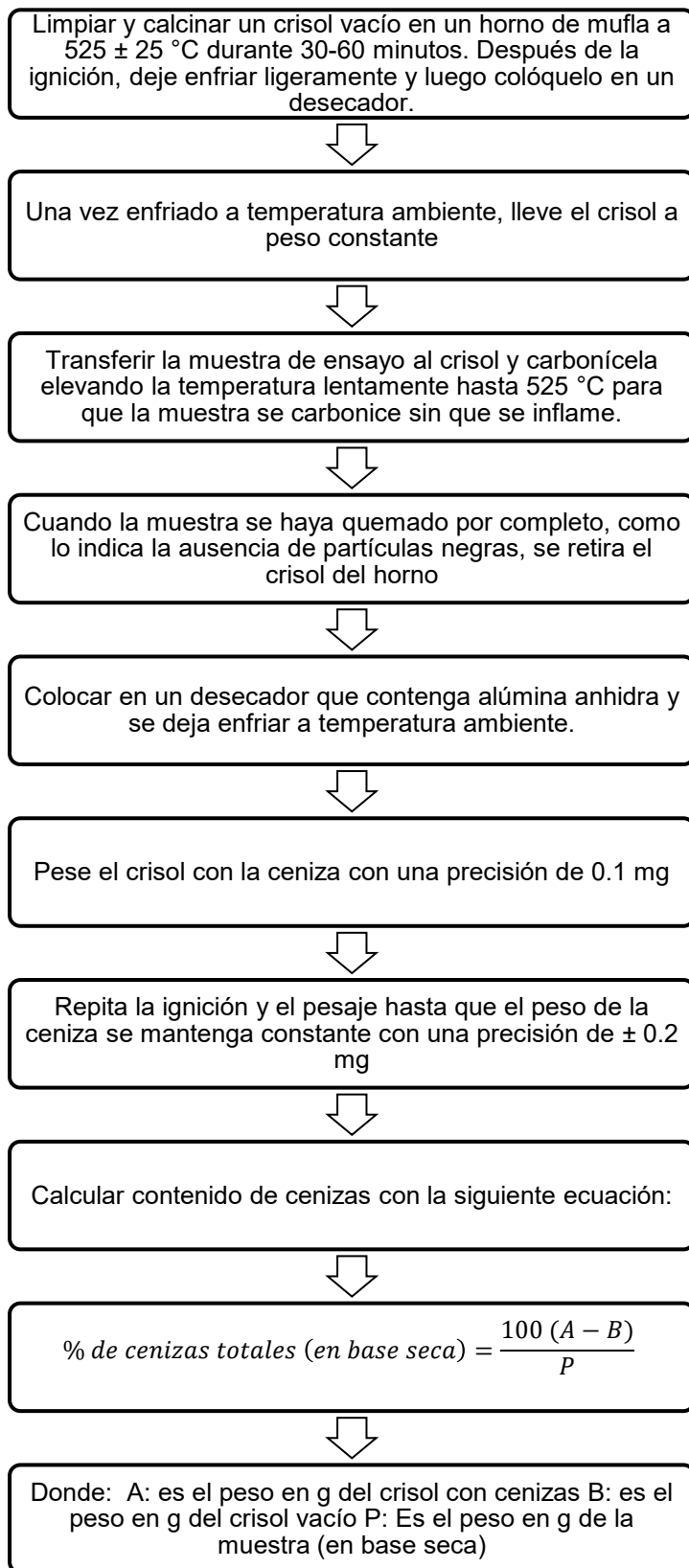
ANEXOS

ANEXO A Proceso de análisis

Humedad (%bh)



Cenizas (%bs)



L. extractivos (%)

Colocar en un cartucho Whatman 10 g de muestra tamizada y seca, asegurándose de que no sobresalga de la capacidad del cartucho.



Colocar en el sistema de extracción (Soxhlet con condensador a reflujo) manteniendo una relación de $\frac{3}{4}$ de solvente con respecto al volumen del balón en una relación 1:2 de etanol, tolueno respectivamente dentro de una mantilla de calentamiento con sensor de temperatura por 6 h



Dejar secar al ambiente durante 24 horas

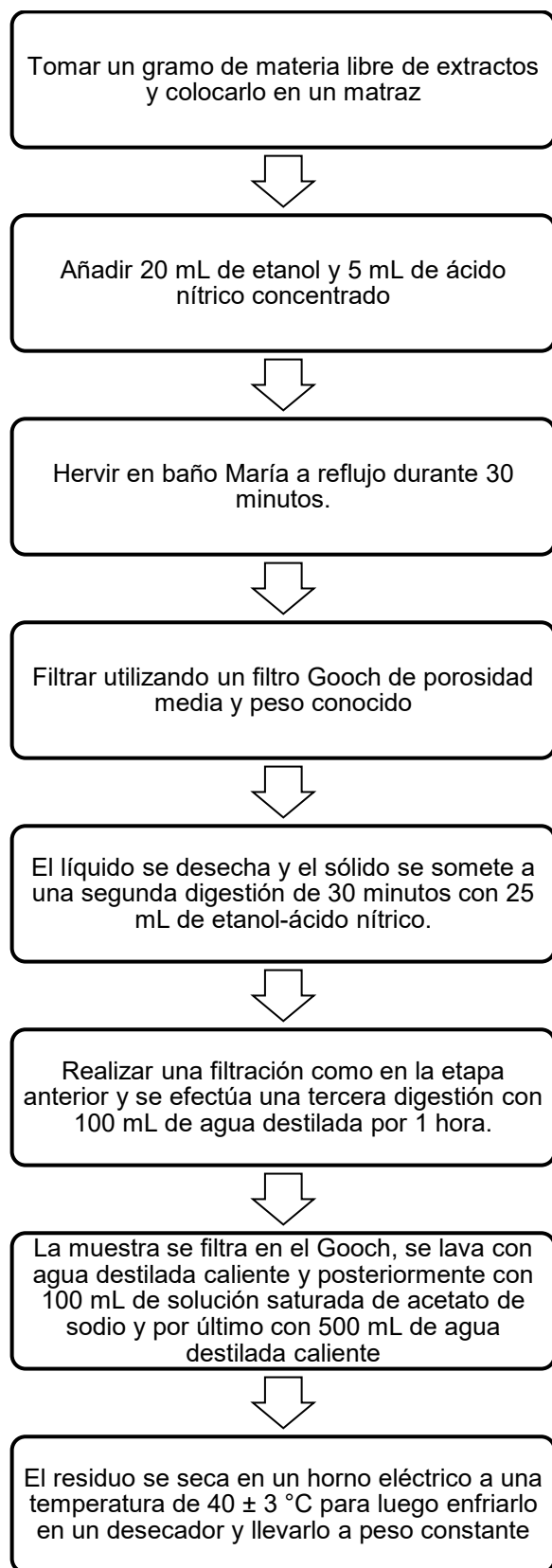


Repetir la extracción Soxhlet para realizar un lavado de la muestra con agua destilada

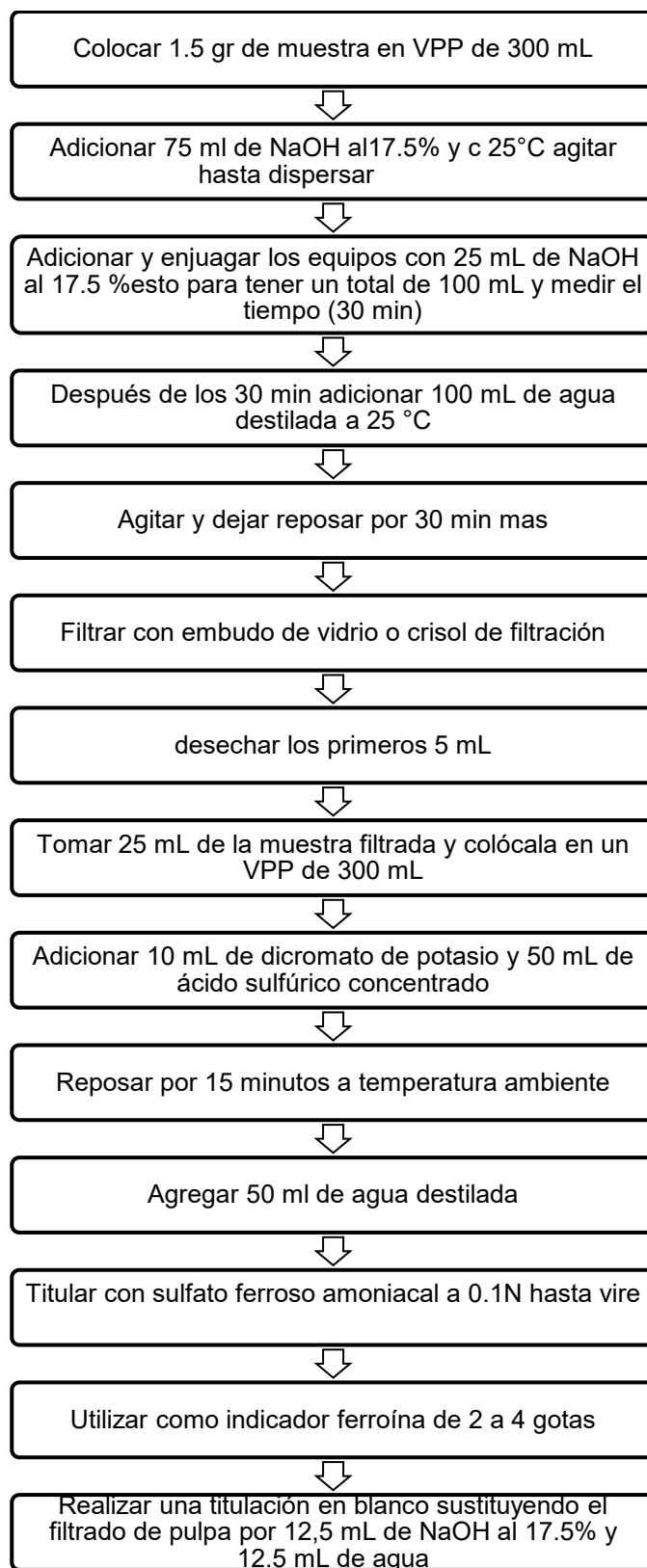


Secar el contenido del dedal (libre de extraíbles) por 48 horas a temperatura ambiente

Celulosa (%)



Alfa celulosa (%)



Beta celulosa (%)

Se calcula con la ecuación:

$$\text{Beta celulosa \%} = 100 - (\text{Alfa celulosa \%} + \text{Gama celulosa \%})$$

Gama celulosa (%)

Pipetear 50 mL del filtrado en una probeta

Agregar 50 mL de H_2SO_4 3 N

Calentar la probeta sumergida en un baño María $70^\circ\text{--}90^\circ\text{C}$

Sedimentar durante 12 horas y filtrar

Pipetear 50 mL de solución transparente y 10 de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0.5 N en un matraz de 300 mL

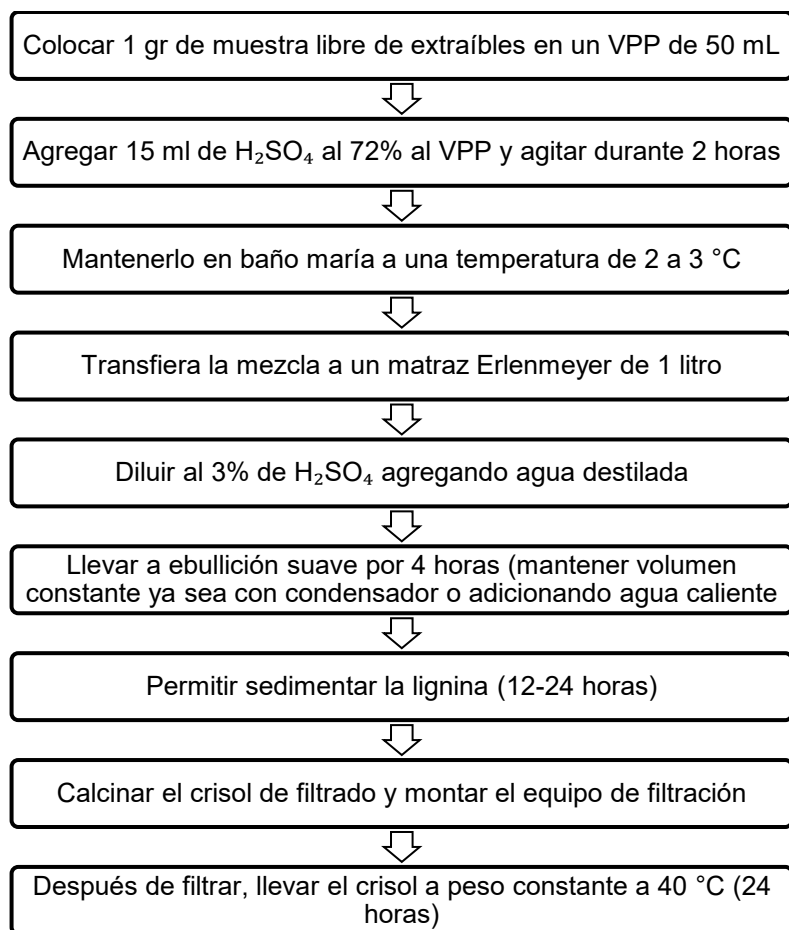
Agregar con cuidado 90 mL de H_2SO_4 concentrado

titular con sulfato ferroso amoniacal a 0.1N hasta vire

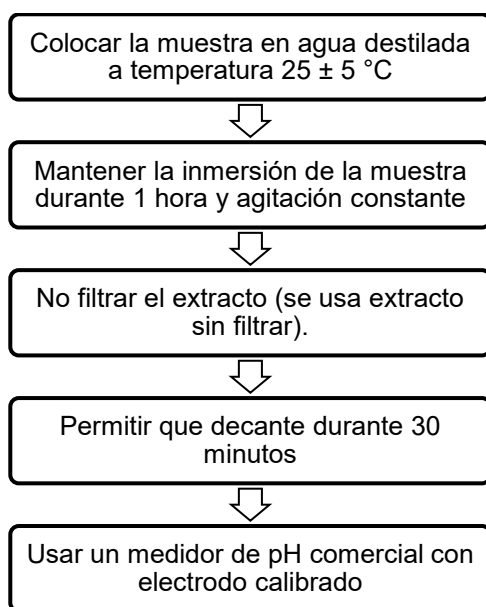
utilizar como indicador ferroína de 2 a 4 gotas

Realice una titulación en blanco sustituyendo la solución con 12,5 mL de NaOH al 17,5 %, 12,5 mL de agua y 25 mL de H_2SO_4 3 N.

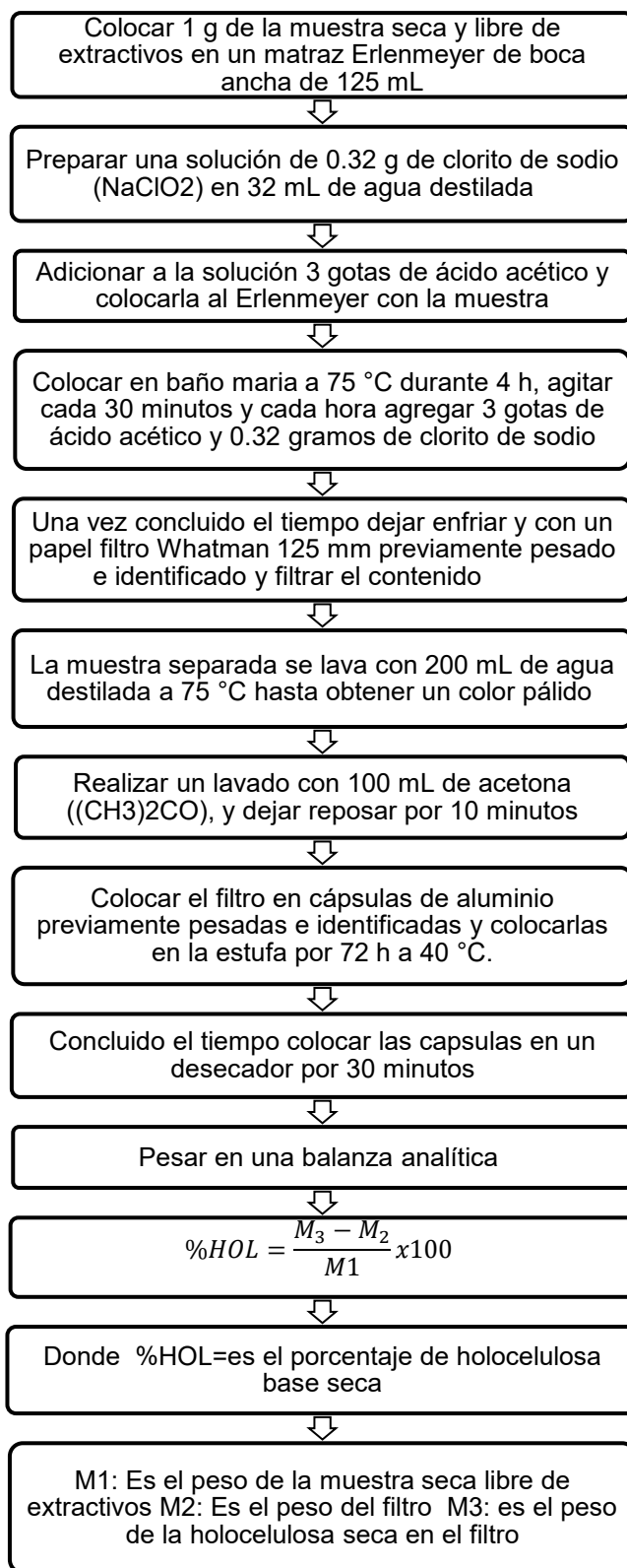
Lignina (%)



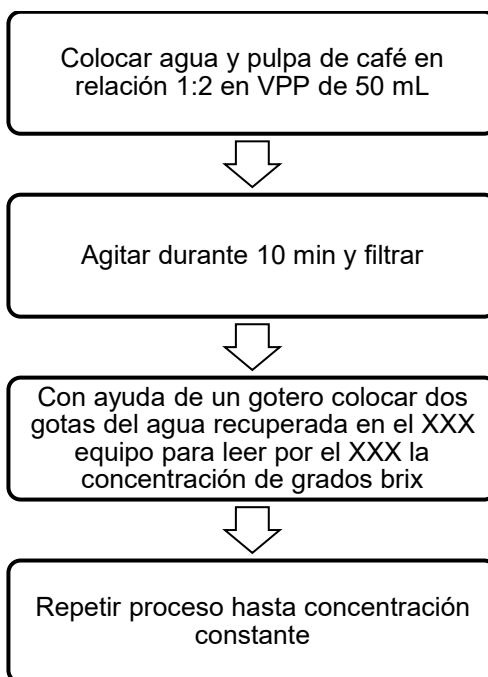
pH



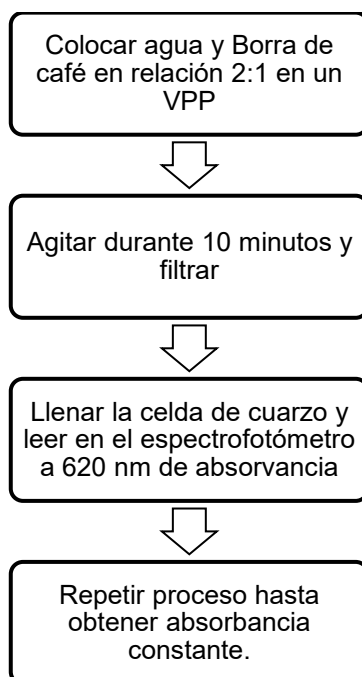
Holocelulosa (%)



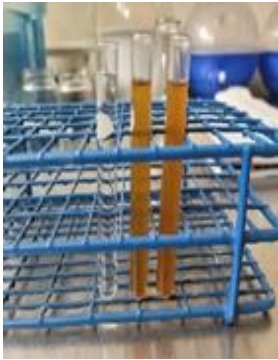
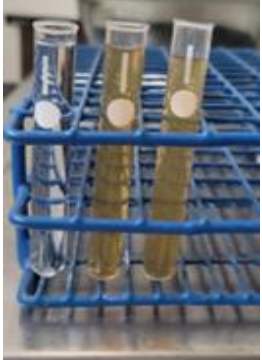
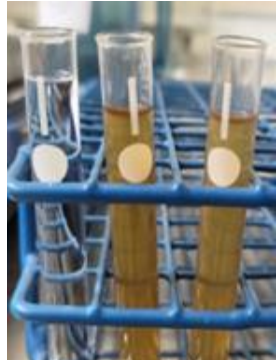
Azucres °Brix en pulpa de café

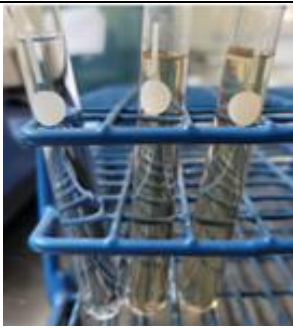
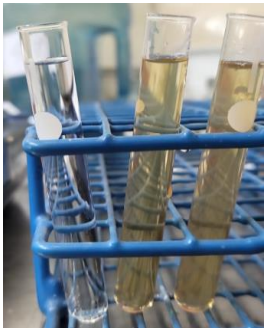
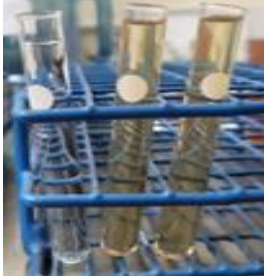
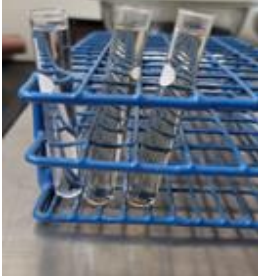
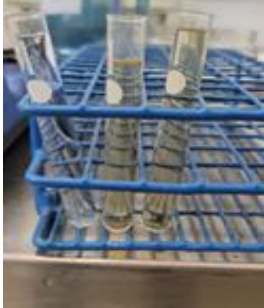


Lavados borra



ANEXO B Lavados de borra

	Muestra compuesta		Muestra simple	
Lavados	1:1	1:2	1:1	1:2
1				
2				
3				
4				

	Muestra compuesta		Muestra simple	
Lavados	1:1	1:2	1:1	1:2
5				
6				
7				
8	-		-	
9	-		-	-

ANEXO C Pruebas de Blanqueo

IMAGEN	DESCRIPCIÓN
	Después de la extracción Kraft en las diferentes condiciones por duplicado, antes de realizar el blanqueo
	Muestras de extracción Kraft con H2O2
	Celulosa de extracción Kraft después del blanqueo

ANEXO D Formación de tortillas

IMAGEN	DESCRIPCIÓN
	Mezclas de relación de celulosa de residuos de café y papel reciclado
	De cada proporción se toman muestras de 100 mL para la formación de "Tortillas"
	Formación de "Tortillas" con bomba de vacío
	"Tortillas" formadas
	"Tortillas" a relación mayor a 70:30
	"Tortillas" finales y empaquetadas para análisis de calidad