

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**



**PROPUESTA DE UN PROCESO SOSTENIBLE PARA LA  
EXTRACCIÓN DE PULPA CELULÓSICA DE FORMA  
ARTESANAL A PARTIR DE BAMBÚ (*Guadua angustifolia*)  
COMO MATERIA PRIMA ALTERNATIVA PARA LA  
PRODUCCIÓN DE PAPEL**

PRESENTADO POR:  
**SONIA ROXANA CASTELLANOS AGUILAR**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
**INGENIERA QUÍMICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2022

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**Msc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

DIRECTORA:

**INGA. SARA ELISABETH ORELLANA BERRIOS**

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE ALIMENTOS**

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERA QUÍMICO**

Título:

**PROPUESTA DE UN PROCESO SOSTENIBLE PARA LA  
EXTRACCIÓN DE PULPA CELULÓSICA DE FORMA  
ARTESANAL A PARTIR DE BAMBÚ (*Guadua angustifolia*)  
COMO MATERIA PRIMA ALTERNATIVA PARA LA  
PRODUCCIÓN DE PAPEL**

Presentado por:

**SONIA ROXANA CASTELLANOS AGUILAR**

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente asesora:

**MSc. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA**

SAN SALVADOR, FEBRERO DE 2022

Trabajo de graduación aprobado por:

Docente asesora:

**MSc. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA**

## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a Dios de que la mayoría de mis seres queridos se encuentran con vida en este momento tan inusual en la historia y les permitió presenciar este logro en mi carrera profesional.

Le dedico este logro a mi papá **Bienvenido Tito Castellanos López** y le agradezco por su apoyo incondicional durante toda mi carrera, por ser tan comprensivo en los momentos difíciles y celebrar orgullosamente mis victorias. Sin él no sería la persona que soy ahora ¡Te amo mucho, papi!

Agradezco a mi mamá **Sonia del Carmen Aguilar Romero** hasta el cielo, porque de alguna forma siempre estuvo presente apoyándome y sé que le hubiera gustado mucho verme triunfar.

Agradezco a mi abuelita **María Concepción Romero Torres**, a mi tía **Adela Cristina Aguilar Romero** que siempre han estado pendientes de mí y me han apoyado incondicionalmente ¡Las amo mucho a las dos!

Agradezco a mi hermanita **Camila Alessandra Castellanos Cisneros**, aunque me desveló al inicio luego sus abrazos después de un parcial difícil me reconfortaron mucho ¡Te amo mucho, chipustillo!

Agradezco a cada docente que contribuyó a crear a la profesional que soy ahora, en especial a mi asesora **Delmy del Carmen Rico Peña** por su invaluable contribución a mis conocimientos y por su comprensión por todos los retos que se han tenido que superar durante este proceso del trabajo de graduación ¡Se le aprecia mucho, ingeniera!

Agradezco a mis compañeros y amigos **Valerie Valle, Nestor Alas y Verónica Reyes** por ser los mejores amigos que la FIA me dejó ¡Se les quiere mucho!

Con mucho cariño,  
Roxana Castellanos

## Resumen

Algunos de los impactos ambientales más significativos de la industria de la pulpa y el papel se dan en el proceso de pulpeo y blanqueo (Greenpeace, 2006). Sin embargo, el impacto ambiental de esta industria proviene desde la silvicultura, por el uso de agroquímicos, y su naturaleza intensiva en la extracción de recursos forestales poniendo en riesgo la biodiversidad (WWF, 2012).

Por lo tanto, se planteó que el proceso de extracción de pulpa celulósica a partir de la especie de bambú *Guadua angustifolia* puede tener un impacto ambiental negativo bajo y la propuesta de pre-diseño puede ser sostenible ambientalmente.

A partir de la investigación teórica, se propuso el pre-diseño del proceso de extracción de la pulpa celulósica a nivel artesanal por el método de la soda (Chiluiza et al., 2009) y el proceso de blanqueo con peróxido de hidrógeno (Qin et al., 2016), para producir un lote semanal de 176 hojas con 160 gsm equivalente a 4,235.26 g de hojas, que implica el procesamiento de 10 kg de bambú en una digestión con solución de NaOH al 5% a 150 °C por 1 h, con un rendimiento del 54.20% (Chiluiza et al., 2009), durante este proceso se produce licor negro que es el principal contaminante del proceso. En el blanqueo la pulpa entra con una consistencia del 10% para una cocción con solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6% a 115 °C durante 60 min con un rendimiento de 86.8% (Qin et al., 2016), totalmente compatible con la producción artesanal, ya que es seguro de usar y no produce ningún contaminante al medio ambiente. Al final del proceso se obtuvo 4,515.50 g de hojas de bambú según el balance de masa.

Luego de la evaluación del impacto ambiental por el método VIA con un valor global de 6.52, se obtuvo que los principales impactos ambientales negativos que habrá que mitigar en el proceso de extracción de pulpa celulósica a partir del bambú son la contaminación del agua superficial, debido al licor negro generado durante el

proceso de extracción, así como los lavados de la pulpa, y la contaminación indirecta del aire, debido al consumo de energía causando emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Por lo tanto, al poner en marcha el proceso se debe garantizar el tratamiento de efluentes y procurar utilizar energías limpias, entre otras medidas como la impermeabilización del suelo en las áreas necesarias para evitar su contaminación y proteger los mantos acuíferos.

Además, se recomienda realizar las pruebas experimentales respectivas para comprobar los datos teóricos con respecto al rendimiento del proceso con los parámetros establecidos.

## Índice de contenido

INTRODUCCIÓN .....	1
OBJETIVOS .....	2
Objetivo General .....	2
Objetivos específicos .....	2
CAPÍTULO I: SOSTENIBILIDAD EN PRODUCCIÓN DE PAPEL Y EL BAMBÚ.....	3
1.1 Producción y sostenibilidad aplicable a la industria de la pulpa y el papel .....	3
1.1.1 Definición de desarrollo sostenible y producción sostenible .....	3
1.1.2 Los tres pilares de la sostenibilidad .....	4
1.1.3 Producción sostenible.....	5
1.1.4 Programas sobre modalidades de consumo y producción sostenibles .....	7
1.1.5 Principios de la ingeniería verde.....	8
1.2 Generalidades del bambú con énfasis en la especie <i>Guadua angustifolia</i> .....	13
1.2.1 Silvicultura del bambú.....	14
1.2.2 Características morfológicas de la <i>Guadua angustifolia</i> .....	21
1.2.3 Características lignocelulósicas de la <i>Guadua angustifolia</i> .....	24
1.2.4 Distribución del bambú en el mundo y América Latina.....	30
1.2.5 Usos y productos del bambú .....	32
1.3 Bambú en El Salvador .....	37
1.3.1 Especies de bambú en El Salvador .....	38
1.3.2 Disponibilidad de bambús en El Salvador .....	39
1.3.3 Usos del bambú y productos de bambú en El Salvador .....	40
1.3.4 Usos potenciales según la especie de bambú.....	42
1.4 Generalidades de la industria de la pulpa y el papel.....	45

1.4.1	Materias primas para la producción de papel .....	45
1.4.2	Proceso general de producción de papel .....	49
1.5	Industria de la pulpa y el papel en El Salvador .....	51
CAPÍTULO II: PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE PULPA CELULÓSICA		
PARA LA PRODUCCIÓN DE PAPEL .....		53
2.1	Procesos mecánicos para extracción de pulpas celulósicas.....	54
2.1.1	Madera triturada .....	54
2.1.2	Pulpa mecánica refinada .....	54
2.1.3	Pulpa termomecánica .....	55
2.1.4	Pulpa quimtermomecánica .....	55
2.2	Procesos semiquímicos para extracción de pulpas celulósicas.....	55
2.2.1	Sulfito neutro .....	56
2.3	Procesos químicos para extracción de pulpas celulósicas .....	56
2.3.1	Proceso kraft .....	56
2.3.2	Proceso del sulfito .....	57
2.3.3	Proceso de soda.....	58
2.4	Tecnología emergente para extracción de pulpas celulósicas.....	59
2.4.1	Proceso organosolv.....	60
CAPÍTULO III: PROCESOS DE BLANQUEO DE PULPAS CELULÓSICAS		
PARA LA PRODUCCIÓN DE PAPEL .....		61
3.1	Agentes blanqueadores para pulpas celulósicas .....	61
3.2	Procesos ECF y TCF de blanqueo de pulpas celulósicas.....	62
3.3	Blanqueo con cloro de pulpas celulósicas .....	63
3.4	Método ECF (parcialmente exento de cloro) de pulpas celulósicas.....	63
3.4.1	Dióxido de cloro como agente blanqueador de pulpas celulósicas .....	64

3.5 Método TCF (totalmente exento de cloro) de pulpas celulósicas.....	66
3.5.1 Oxígeno como agente blanqueador de pulpas celulósicas.....	67
3.5.2 Ozono como agente blanqueador de pulpas celulósicas.....	69
3.5.3 Peróxido de hidrógeno como agente blanqueador de pulpas celulósicas .....	70
3.6 Secuencias de blanqueo de pulpas celulósicas.....	71
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN PARA EL PRE- DISEÑO DEL PROCESO SOSTENIBLE DE EXTRACCIÓN DE PULPA CELULÓSICA A PARTIR DE BAMBÚ .....	
4.1.1 Metodología de la revisión bibliográfica del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	75
4.2 Metodología para la selección del proceso de blanqueo de la pulpa de bambú.....	76
4.2.1 Metodología Pugh para la selección del proceso de blanqueo de la pulpa de bambú.....	76
4.3 Metodología del pre-diseño del proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú.....	77
4.3.1 Definición de los criterios y especificaciones a aplicar al proceso sosteni- ble de la extracción de pulpa celulósica de bambú.....	77
4.3.2 Diagrama global a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú .....	78
4.3.3 Diagrama de bloques a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú .....	78
4.3.4 Diagrama de flujo a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú .....	79

4.3.5	Balance de materia por operación unitaria a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú .....	79
4.3.6	Selección y dimensionamiento de equipos a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú .....	80
4.4	Metodología de control de calidad a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú .....	80
4.5	Metodología de evaluación de impactos ambientales a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú.....	81
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....		85
5.1	Revisión bibliográfica del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú.....	85
5.2	Selección del proceso de blanqueo de la pulpa de bambú .....	85
5.3	Selección del proceso de extracción de la pulpa de bambú .....	87
5.4	Pre-diseño del proceso de extracción de pulpa celulósica para papel de bambú.....	87
5.4.1	Definición de los criterios y especificaciones del papel artístico a partir de bambú.....	87
5.4.2	Diagrama global del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú.....	88
5.4.3	Diagrama de bloques del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú.....	88
5.4.4	Parámetros del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	90
5.4.5	Diagrama de bloques del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú.....	91
5.4.6	Balances de masa de cada operación unitaria del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	92

5.4.7 Selección y dimensionamiento de equipos para el proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	107
5.5 Metodología de control de calidad del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	114
5.5.1 Control de calidad del bambú .....	114
5.5.2 Control de calidad para la pulpa celulósica .....	119
5.6 Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	123
5.6.1 Identificación de los aspectos ambientales del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú. ....	123
5.6.2 Descripción de los impactos ambientales del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	126
5.6.3 Resultados y análisis de la evaluación de impacto ambiental del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	130
6 Conclusiones .....	132
7 Recomendaciones .....	135
8 OBSERVACIONES .....	137
9 GLOSARIO .....	138
10 BIBLIOGRAFÍA .....	144
11 ANEXOS .....	153

## Índice de tablas

Tabla 1.1.	Contenido lignocelulósico del bambú <i>Guadua angustifolia</i> .....	29
Tabla 1.2.	Contenido lignocelulósico de otras especies de bambú .....	29
Tabla 1.3.	Géneros y especies de bambú en El Salvador.....	39
Tabla 1.4.	Cultivos de bambú en El Salvador (Hectáreas).....	40
Tabla 1.5.	Clasificación de plantas no madereras.....	47
Tabla 1.6.	Especies forestales usadas en la industria de la pulpa (Latifoliadas).....	48
Tabla 1.7:	Especies forestales usadas en la industria de la pulpa (Coníferas) ...	48
Tabla 1.8.	Empresas de la industria del papel, cartón y artes gráficas en El Salvador .....	52
Tabla 2.1.	Tipos de pasta según su proceso de obtención .....	53
Tabla 3.1.	Condiciones para deslignificación con oxígeno.....	68
Tabla 3.2.	Simbología de químicos en el blanqueo.....	72
Tabla 3.3.	Ventajas y desventajas de químicos en el blanqueo.....	72
Tabla 3.4.	Secuencias de blanqueo para reducir o eliminar el cloro .....	74
Tabla 4.1.	Valoración del criterio de extensión.....	82
Tabla 4.2.	Valoración del criterio de duración .....	82
Tabla 4.3.	Valoración del criterio de reversibilidad .....	83
Tabla 4.4.	Significado del valor VIA .....	84
Tabla 5.1.	Selección del proceso de blanqueo de la pulpa de bambú .....	86
Tabla 5.2.	Especificaciones del papel artístico a partir de bambú.....	87
Tabla 5.3.	Parámetros de operación del proceso de producción de papel .....	90
Tabla 5.4.	Entradas y salidas de la trituración del bambú .....	93
Tabla 5.5.	Entradas y salidas del tamizado de bambú .....	94
Tabla 5.6.	Entradas y salidas en el proceso de humectación del bambú.....	95
Tabla 5.7.	Entradas y salidas en el proceso de escurrido del bambú .....	96
Tabla 5.8.	Entradas y salidas en el proceso de digestión del bambú.....	97
Tabla 5.9.	Entradas y salidas en el proceso de lavado de la pulpa de bambú....	98

Tabla 5.10. Entradas y salidas en el proceso de blanqueo de la pulpa de bambú .....	99
Tabla 5.11. Entradas y salidas en el proceso de lavado de pulpa de bambú blanqueada.....	100
Tabla 5.12. Entradas y salidas en el proceso de batido de la pulpa de bambú...	101
Tabla 5.13. Entradas y salidas en el proceso de formación de hoja de bambú...	102
Tabla 5.14. Entradas y salidas en el proceso de prensado de la hoja de pulpa de bambú .....	103
Tabla 5.15. Entradas y salidas en el proceso de secado de la hoja de bambú ...	104
Tabla 5.16. Cuadro resumen de entradas y salidas en el proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú .....	105
Tabla 5.17. Equipos de trituración para el bambú .....	108
Tabla 5.18. Equipos para la digestión del bambú .....	109
Tabla 5.19. Equipos para el lavado de la pulpa de bambú.....	110
Tabla 5.20. Equipos para refinado de la pulpa de bambú .....	111
Tabla 5.21. Resumen de equipos seleccionados para producción de papel de bambú .....	112
Tabla 5.22. Identificación de los aspectos ambientales resultantes de la producción de papel a partir del bambú .....	124
Tabla 5.23. Identificación de impactos ambientales de la producción de papel a partir del bambú .....	126
Tabla 5.24. Identificación de impactos ambientales negativos y positivos de la producción de papel a partir del bambú.....	127
Tabla 5.25. Numeración de impactos ambientales negativos de la producción de papel a partir del bambú.....	128
Tabla 5.26. Evaluación de impactos ambientales de la extracción de pulpa celulósica de bambú.....	131

## Índice de figuras

Figura 1.1.	Pilares del desarrollo sostenible.....	4
Figura 1.2.	Características externas de los tallos de <i>Guadua angustifolia</i> según la edad.....	21
Figura 1.3	Partes del bambú .....	22
Figura 1.4.	Estructura de la celulosa .....	25
Figura 1.5.	Glucomanano presente en maderas blandas.....	26
Figura 1.6.	Xilano presente en maderas duras .....	26
Figura 1.7.	Estructura de la lignina de madera blanda .....	27
Figura 1.8.	Precusores de la lignina.....	28
Figura 1.9.	Hábitat natural del bambú .....	30
Figura 1.10.	Área con bambú por país .....	31
Figura 3.1.	Reacción entre unidades fenólicas de lignina y dióxido de cloro .....	65
Figura 3.2	Reacciones entre el ozono y diversas unidades estructurales de la lignina .....	69
Figura 4.1.	Ejemplo de diagrama global de un proceso .....	78
Figura 4.2.	Ejemplo de diagrama de bloques de un proceso .....	78
Figura 4.3.	Ejemplo de diagrama de flujo de producción de químicos .....	79
Figura 4.4.	Balance de materia para una operación unitaria.....	79
Figura 5.1.	Diagrama global del proceso de producción de papel.....	88
Figura 5.2.	Diagrama de bloques del proceso de producción de papel de bambú .....	89
Figura 5.3.	Diagrama de flujo del proceso de producción de papel .....	91
Figura 5.4.	Entradas y salidas en el proceso de trituración de bambú .....	92
Figura 5.5.	Entradas y salidas en el proceso de tamizado de bambú .....	93
Figura 5.6.	Entradas y salidas en el proceso de humectación del bambú.....	94
Figura 5.7.	Entradas y salidas en el proceso de escurrido del bambú .....	95
Figura 5.8.	Entradas y salidas en el proceso de digestión del bambú.....	96
Figura 5.9.	Entradas y salidas en el proceso de lavado de la pulpa de bambú .....	97

Figura 5.10. Entradas y salidas en el proceso de blanqueo de la pulpa de bambú .....	98
Figura 5.11. Entradas y salidas en el proceso de lavado de pulpa de bambú blanqueada .....	99
Figura 5.12. Entradas y salidas en el proceso de batido de la pulpa de bambú .....	100
Figura 5.13. Entradas y salidas en el proceso de formación de hoja de bambú .....	101
Figura 5.14. Entradas y salidas en el proceso de prensado de la hoja de pulpa de bambú .....	102
Figura 5.15. Entradas y salidas del proceso de secado de la hoja de bambú....	103

## INTRODUCCIÓN

Con la tendencia al consumo responsable, el costo de eliminación de desechos y expansión de la legislación ambiental se incrementa la demanda de productos respetuosos con el medio ambiente y por consiguiente la producción responsable, siendo éstos también objetivos del desarrollo sostenible. En consecuencia, los productores se ven obligados a evaluar sus procesos de producción, así como buscar tecnologías y materias primas alternativas con el menor impacto ambiental.

El bambú como materia prima virgen es una alternativa tentativa a las materias primas tradicionales, y la especie *Guadua angustifolia* presenta características adecuadas para la fabricación de papel.

En este trabajo de investigación, se pre diseñó un proceso de extracción de pulpa de bambú *Guadua angustifolia* tomando en cuenta la minimización de los impactos ambientales. Sin embargo, el consumo de agua durante toda la producción es inevitable y con ello la generación de aguas residuales. Por lo tanto, en la puesta en marcha del proceso se debe cumplir con el tratamiento de efluentes para garantizar su sostenibilidad ambiental.

Se partió de la selección de un proceso de blanqueo que no fuera una amenaza para el medio ambiente, ni la salud y seguridad ocupacional de las personas resultando elegido el proceso de blanqueo con peróxido de hidrógeno. El proceso de extracción de la pulpa seleccionado fue el proceso de la soda, debido a su fácil aplicación a nivel artesanal y su compatibilidad con blanqueos de una sola etapa con peróxido de hidrógeno.

## OBJETIVOS

### Objetivo General

Proponer un proceso sostenible para la extracción de pulpa celulósica de forma artesanal a partir de la especie de bambú (*Guadua angustifolia*) como materia prima alternativa para la producción de papel.

### Objetivos específicos

- a) Investigar métodos de procesos de extracción de pulpa celulósica y proponer su aplicación para el uso del bambú como materia prima y su sostenibilidad ambiental.
- b) Establecer el proceso de evaluación de la calidad de la materia prima (*Guadua angustifolia*) y de la pulpa celulósica.
- c) Proponer un proceso de blanqueo totalmente libre de cloro.
- d) Proponer un pre-diseño del proceso de extracción de la pulpa celulósica.
- e) Identificar y valorar el impacto ambiental del proceso propuesto.

# CAPÍTULO I

## SOSTENIBILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL Y EL BAMBÚ

Con la tendencia al consumo responsable, el costo de eliminación de desechos y expansión de la legislación ambiental se incrementa la demanda de productos respetuosos con el medio ambiente y por consiguiente la producción responsable, siendo éstos también objetivos de desarrollo sostenible. En consecuencia, los productores se ven obligados a evaluar sus procesos de producción, así como buscar tecnologías y materias primas alternativas con el menor impacto ambiental (Bajpai, 2015). Este capítulo aborda los principios de la producción sostenible y presenta la necesidad de adoptar dicho enfoque en la ejecución de los procesos productivos, así también una examinación del bambú como alternativa de materia prima y sus diversas aplicaciones en la industria, con énfasis en la producción de papel.

### **1.1 Producción y sostenibilidad aplicable a la industria de la pulpa y el papel**

La relación entre la producción y el medio ambiente suele ser controvertida y considerada mutuamente excluyente pero este apartado busca presentar no únicamente la urgencia de impulsar la convergencia entre ambas, sino además su viabilidad, mediante un análisis descriptivo del paradigma de la sostenibilidad y sus vinculaciones con el desarrollo humano, así como con la producción en la industria.

#### **1.1.1 Definición de desarrollo sostenible y producción sostenible**

En la actualidad, se sigue empleando la definición de desarrollo sostenible propuesto en 1987 en el informe “Nuestro futuro común” o “informe Brundtland” elaborado por distintas naciones para la Organización de Naciones Unidas (ONU) por la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CMMAD) encabezada por

la doctora Gro Harlem Brundtland, ex primera ministra de Noruega. (Toro Sánchez, 2007).

Sobre el desarrollo sostenible se dice que:

“La humanidad tiene la capacidad de hacer que el desarrollo sea sostenible para asegurar que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. El concepto de desarrollo sostenible implica límites, no límites absolutos, sino limitaciones impuestas por el estado actual de la tecnología, la organización social a los recursos ambientales y por la capacidad de la biosfera para absorber los efectos de las actividades humanas. Pero la tecnología y la organización social pueden gestionarse y mejorarse para dar paso a una nueva era de crecimiento económico...” (CMMAD, 1987).

### 1.1.2 Los tres pilares de la sostenibilidad

El desarrollo sostenible implica aspectos ambientales, económicos y sociales. Para que un proceso particular sea sostenible, no debe causar un cambio irreversible en el medio ambiente, debe ser económicamente viable y debe beneficiar a la sociedad (Fedkin, 2020).



Figura 1.1. Pilares del desarrollo sostenible (MINTIC y MINEDUCACIÓN, 2020)

Los aspectos ambientales incluyen el uso de los recursos naturales, la prevención de la contaminación, la biodiversidad y la salud ecológica. Los aspectos sociales incluyen el nivel de vida, la disponibilidad de educación, empleo, entre otros, y la igualdad de oportunidades para todos los miembros de la sociedad. Los factores económicos son los motores del crecimiento, los beneficios, la reducción de los costes y las inversiones en investigación y desarrollo. La interacción de las esferas sociales y económicas da lugar a la formulación de aspectos socioeconómicos combinados. Esos son, por ejemplo, la ética empresarial, el comercio justo y los beneficios para los trabajadores. Al mismo tiempo, la combinación de intereses económicos y ambientales facilita el aumento de la eficiencia energética, el desarrollo de combustibles renovables, las tecnologías verdes y también la creación de incentivos y subsidios especiales para las empresas ecológicamente racionales. La intersección de las esferas social y ambiental conduce a la creación de políticas de conservación y protección del medio ambiente, al establecimiento de la justicia ambiental y a la administración mundial para el uso sostenible de los recursos naturales (Fedkin, 2020).

### **1.1.3 Producción sostenible**

El informe de Burtland en su capítulo 8 “Industria: Producir más con menos”, menciona que se debería alentar a que las industrias y operaciones industriales sean más eficientes en cuanto al uso de los recursos, que generen menos contaminación y desechos, que se basen en el uso de recursos renovables en lugar de no renovables y que reduzcan al mínimo los efectos adversos irreversibles en la salud humana y el medio ambiente. Además, resalta que las fábricas de pasta y papel más antiguas solían utilizar aproximadamente 160 metros cúbicos de agua por tonelada de pasta, pero las construidas durante los años 70's, sin embargo, sólo utilizaban 70 metros cúbicos. Con técnicas avanzadas que mantienen el agua circulando dentro de un sistema cerrado, y con una capacitación adecuada del personal, las tasas de utilización podrían reducirse a 20-30 metros cúbicos por

tonelada de pulpa. Sin embargo, según Greenpeace Argentina otro de los mayores impactos que se generan es debido al blanqueo con cloro y solamente el 5% de la pulpa y el papel se produce totalmente libre de cloro (Greenpeace, 2006) su pronunciamiento es producto del conflicto territorial y socio ambiental que surgió entre Uruguay y Argentina desde el 2002 al 2010 por la instalación de plantas de celulosa en aguas binacionales en el Río Uruguay (Sannazzaro, 2011).

Actualmente se encuentran en riesgo los bosques naturales y especies de vida silvestre de Borneo y Sumatra, Papua Nueva Guinea, el Lejano Oriente ruso, el sur de Chile y la región de bosques atlánticos en Brasil debido a la creciente demanda de madera para pulpa (WWF, 2020), por lo que esta industria aún no se puede considerar un ejemplo de sostenibilidad.

A pesar de que desde los 80's se habla de desarrollo sostenible no fue hasta el 2015 que se plantearon los objetivos para conseguirlo, entre los cuáles la producción sostenible se encuentra en el objetivo 12 de producción y consumo responsable y se dice que, para lograr crecimiento económico y desarrollo sostenible, es urgente reducir la huella ecológica mediante un cambio en los métodos de producción y consumo de bienes y recursos (PNUD, 2020). En el Simposio de Oslo sobre Consumo y Producción Sostenibles de 1994 se definió al consumo y la producción sostenibles como "Hacer más y mejores cosas con menos recursos. Se trata del uso de bienes y servicios que responden a necesidades básicas y proporcionan una mejor calidad de vida, al mismo tiempo que minimizan el uso de recursos naturales, materiales tóxicos y emisiones de desperdicios y contaminantes sobre el ciclo de vida, de tal manera que no se ponen en riesgo las necesidades de futuras generaciones" (Hoballah y Averous, 2015), definición que también tiene sus raíces en el Informe Brundtland.

#### **1.1.4 Programas sobre modalidades de consumo y producción sostenibles**

La industria de la pulpa y el papel está relacionada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 3: Salud y bienestar, 6: Agua limpia y saneamiento, 7: Energía asequible y no contaminante, 9: Industria, innovación e infraestructura, ODS 12: Producción y el consumo responsable y 15: Vida de ecosistemas terrestres.

Dentro del ODS 12, se contempla el Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles adoptado por las Naciones Unidas en la Cumbre de Rio+20 de 2012, el cual pretende acelerar la transición a modalidades de consumo y producción sostenibles tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo. (Hoballah y Averous, 2015).

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Rio+20) reafirmó que “promover patrones de consumo y producción sostenibles (CPS) es uno de los tres objetivos generales y requisitos indispensables para el desarrollo sostenible...”. También reiteró que son imprescindibles los cambios fundamentales en la manera en que las sociedades consumen y producen para lograr el desarrollo sostenible a nivel global (Ribeiro Viotti, 2012).

Los seis programas que actualmente tiene el marco decenal son:

- a) Información al consumidor
- b) Estilos de vida sostenibles y educación
- c) Compras públicas sostenibles
- d) Edificaciones y construcción sostenibles
- e) Turismo sostenible, incluyendo ecoturismo
- f) Sistema de alimentación sostenible

De todos ellos, solamente se ha mencionado a la industria de la pulpa y el papel en el programa de compras públicas sostenibles, que consiste en una asociación

mundial voluntaria de múltiples interesados en la que diversas partes gubernamentales, no gubernamentales, públicas y privadas acuerdan trabajar juntas de manera sistemática con el fin de promover y acelerar la aplicación de las adquisiciones públicas sostenibles en todo el mundo como forma de garantizar pautas de consumo y producción sostenibles (The One Planet Network, 2020).

Países como Uruguay, Costa Rica y Chile, a nivel latinoamericano, han optado por hacer un análisis de productos prioritarios y establecer criterios para las compras públicas, entre los cuales se encuentra el papel de impresión como suministro de oficina y se consideran como criterios o impactos ambientales significativos la procedencia de la materia prima para la fabricación de papel, es decir, si es que la materia prima provenía o no de bosques manejados sustentablemente, el contenido de fibra reciclada del producto y el contenido de cloro (Ministerio de Medio Ambiente de Chile, 2014). Otros criterios también incluyen el consumo de agua y el manejo de los residuos generados en el proceso de producción y el papel debe ser como mínimo libre de cloro elemental (ACCE<sup>1</sup>, 2017), incluso a largo plazo se espera realizar compras de papel que no necesiten de ningún tipo de blanqueo (Ministerio de Hacienda de Costa Rica, 2011).

### **1.1.5 Principios de la ingeniería verde**

Estos 12 principios de ingeniería, están basados en la química verde (Gómez Cívicos, 2008) y proporcionan un marco para que los científicos e ingenieros participen en el diseño de nuevos materiales, productos, procesos y sistemas que son benignos para la salud humana y el medio ambiente (Anastas y Zimmerman, 2003).

---

<sup>1</sup> Agencia de Compras y Contrataciones del Gobierno de Uruguay

### **1. Inherente en lugar de circunstancial**

Desde la etapa de diseño, se debe hacer el esfuerzo de asegurar que todas las entradas y salidas de materia y energía no causen daño al medio ambiente o a las personas a lo largo de su ciclo de vida.

Todos los productos químicos tienen propiedades que nos ayudan a caracterizarlos y diferenciarlos unos de otros como el punto de ebullición, los puntos de fusión, los puntos de congelación, la presión de vapor, la solubilidad en agua, entre otros, pero ahora es necesario tomar muy en cuenta las propiedades relacionadas con la toxicidad para los organismos ambientales y humanos.

### **2. Prevención en lugar de tratamiento**

Es mejor prevenir la contaminación que tratar o limpiar el residuo ya producido.

Para una reacción química, la pregunta importante no es sólo qué cantidad del producto deseado se puede formar, sino también qué cantidad del producto no deseado se forma (y cuánto será necesario desechar), lo cual puede ser determinado por el parámetro de selectividad.

### **3. Diseño para separación**

Las operaciones de separación y purificación deben diseñarse para minimizar el consumo de energía y el uso de materiales.

Los procesos de separación industrial requieren mucha energía y en la mayoría de los casos no se han acercado a los límites termodinámicos del trabajo mínimo de separación. Históricamente, para la separación de gases líquidos y condensables, la destilación multietapa ha sido el proceso de trabajo, basado en las diferencias de punto de ebullición entre los componentes a separar, pero estas operaciones implican un gran consumo de energía. Por lo tanto, evitar la destilación, hacer que

la destilación sea más eficiente y buscar alternativas a la destilación son aspectos muy importantes para implementar este principio.

#### **4. Maximizar la eficiencia**

Los productos, procesos y sistemas deben diseñarse para maximizar la eficiencia de masa, energía, espacio y tiempo.

La maximización se logra informando a los científicos e ingenieros para crear diseños que maximicen la eficiencia en múltiples áreas como masa, energía, espacio (es decir, bienes raíces) y tiempo. Este es un camino simple y lógico que debe tomarse y los beneficios obtenidos pueden ser bastante significativos. Sin embargo, en lugar de centrarse en estas áreas individualmente, al integrar estas áreas, los beneficios obtenidos pueden aumentar aún más. Esto se debe a la alta interdependencia de un área sobre otra.

#### **5. Producción bajo demanda vs. Producción para oferta**

Los productos, procesos y sistemas deben ser "extraídos de la producción" en lugar de "impulsados por la oferta" mediante el uso de energía y materiales.

La importancia de las materias primas económicas para la empresa química no puede descartarse. La disponibilidad de materiales, combinada con las economías de las instalaciones a gran escala, ha aportado un enorme valor a la calidad de vida. Sin embargo, las materias primas genéricas y las grandes instalaciones inevitablemente generarán desechos. Por ello, se incentiva la producción a pequeña escala.

#### **6. Conservar la complejidad**

La entropía y la complejidad integradas deben verse como una inversión cuando se toman decisiones de diseño sobre reciclaje, reutilización o disposición beneficiosa.

La complejidad en un estado inicial depende de factores tales como el número de átomos y/o grupos funcionales presentes en una molécula, el tipo, la calidad y la cantidad de energía dentro de un sistema y el valor económico en un material o proceso de partida.

Este concepto de retención de la complejidad también se puede aplicar a las consideraciones sobre el final de la vida útil de los productos. Hemos visto enormes esfuerzos en el diseño de productos químicos y productos que han reducido o minimizado el impacto en el medio ambiente y la salud humana durante la fase de uso de su ciclo de vida. Esto ha dado como resultado importantes avances en la identificación y el suministro de alternativas a productos químicos y productos más impactantes en uso. Recientemente, este concepto se ha ampliado aún más al considerar la fase final de la vida útil y centrarse en el diseño de productos para descomponerse de forma natural o estar diseñados para su reutilización, reciclaje y reutilización.

## **7. Durabilidad en lugar de inmortalidad**

La durabilidad dirigida, no la inmortalidad, debe ser un objetivo de diseño.

Esto se puede relacionar a la biodegradabilidad de los productos y su ciclo de vida, ya que aquellos productos que no pueden ser reutilizados o reciclados terminarán siendo un problema para la salud humana y/o el medioambiente.

## **8. Satisfacer las necesidades, minimizar el exceso**

Las soluciones de diseño para capacidades o capacidades innecesarias (por ejemplo, "una talla para todos") deben considerarse un defecto de diseño.

Esto implica minimizar los factores de corrección para evitar sobredimensionamientos o producción en exceso como se hace tradicionalmente bajo la perspectiva de tomar en cuenta el "peor escenario posible".

## **9. Minimiza la diversidad de materiales**

La diversidad de materiales en productos multicomponentes debe minimizarse para promover el desmontaje y la retención de valor.

El reciclado y la biodegradabilidad al final de la vida útil se facilita cuando los productos poseen un solo material o un mecanismo de reacción simple.

## **10. Integrar flujos de materiales y energía**

El diseño de productos, procesos y sistemas debe incluir integración e interconectividad con los flujos de energía y materiales disponibles.

A gran escala, un proceso químico es un sistema de unidades, entradas, salidas y corrientes de reciclaje interrelacionadas. Aunque puede ser más fácil estudiar unidades separadas a medida que conocemos su funcionamiento interno, el proceso químico no es realmente un conjunto de partes separadas, sino una unidad completa donde los componentes individuales están íntimamente relacionados.

El principio de integración de flujos de materiales y energía nos recuerda que debemos tratar los procesos como un sistema completo y utilizar las interrelaciones de las partes para nuestro beneficio. Los ingenieros químicos reconocerían esto como la aplicación de la integración de procesos. La integración de procesos se entiende mejor como un marco holístico y sistemático para optimizar la masa y la energía requeridas para un proceso dado.

## **11. Diseño para “vida futura” comerciable**

Los productos, procesos y sistemas deben estar diseñados para funcionar en una "vida futura" comercial.

La idea es facilitar que el usuario haga lo correcto y evitar impactos innecesarios después de que un producto o proceso haya llegado al final de su vida útil. Si no

tomamos en consideración los aspectos del final de la vida útil, podemos tener literalmente toneladas de materiales, ya sea en vertederos o en condiciones salvajes.

La aplicación de este principio al diseño electrónico puede ayudar a los ingenieros a crear características que permitan la recuperación de materiales para su reutilización en productos de igual o mayor valor, ya sea para reciclarlos o reutilizarlos. Las características de desmontaje permiten la clasificación y extracción rápidas de componentes y materiales para el mantenimiento.

## **12. Renovable en lugar de agotable**

Los insumos de materiales y energía deben ser renovables en lugar de agotarse.

A medida que la población humana en la Tierra aumente a un pico proyectado de 9-10 mil millones desde su nivel actual de 7 mil millones para 2100 y a medida que aumente el nivel de vida para muchos en los países en desarrollo, se ejercerá una presión cada vez mayor sobre los recursos finitos. A medida que la mayor demanda se encuentra con un suministro de recursos cada vez más reducido, los precios de los materiales básicos y la energía aumentarán. También, existen costos ambientales por la dependencia continua de materias primas no renovables.

### **1.2 Generalidades del bambú con énfasis en la especie *Guadua angustifolia***

El Bambú es una de las plantas más versátiles del planeta, familia de los pastos, que emerge del suelo con el diámetro definitivo y alcanza su altura total en un lapso de entre 90 – 120 días, dependiendo de la especie. Además, posee amplias aplicaciones como la protección de cuencas ríos, quebradas, protección de taludes y cárcavas, fuentes de agua, construcción de vivienda, elaboración de artesanías, como tutores en la agricultura, generación de energía y muchos más (MAG, 2019).

El bambú también madura rápidamente, dentro de 3 a 5 años, y su cosecha selectiva anual hace que las plantaciones de bambú sean relativamente resistentes a la tala y a la deforestación. Estas características, combinado con la propagación mundial del bambú y el potencial de su área de crecimiento, hacen del bambú un esencialmente un recurso renovable, y uno bien adaptado a la economía circular. Este es un ejemplo clásico de una planta con la que "la tasa de cosecha de los productos forestales no excederá de los niveles que pueden ser permanentemente sostenido" (van der Lugt y King, 2019).

Los bambús (subfamilia Bambusoideae) se encuentran entre las gramíneas de hoja ancha (Poaceae) asociadas a los hábitats forestales, pero los bambús son el único linaje importante de gramíneas que se diversifica en los bosques (Clark, 2006). La *Guadua* fue descrita por primera vez por Kunth en 1822, pertenece a la familia de las gramíneas (Poaceae), subfamilia Bambusoideae, Bambuseae, subtribución Guaduinae y género *Guadua*. La subtribución Guaduinae incluye los géneros *Apoclada*, *Criciuma*, *Eremocaulon*, *Olmecca*, *Otatea* y *Guadua*. Los tres primeros géneros se dan sólo en el Brasil; *Olmecca* y *Otatea* en México; y *Guadua* de México a Argentina. La *Guadua* comprende los bambús más grandes e importantes de la América tropical. Es endémica de América con aproximadamente 25 especies distribuidas desde México (22° 55'N) hasta el norte de Argentina (30°S), y se puede encontrar en altitudes que van desde el nivel del mar hasta los 2200 metros (Londoño, 1995).

### **1.2.1 Silvicultura del bambú**

Las prácticas silvícolas con los bambús, adoptadas casi exclusivamente en Asia, son relativamente sencillas.

“Las cañas maduras se cortan y la regeneración se consigue a partir de las nuevas cañas que nacen cada año de los rizomas subterráneos siendo esta simple práctica

la seguida en todo lugar, con independencia de la especie o del tipo de bosque. Sólo después de la floración gregaria, que de ordinario se produce a largos intervalos y tras de la cual las cañas de casi todas las especies se marchitan y mueren, se recurre a las semillas para la regeneración” (Huberman, 1959)

En el marco del proyecto “Cooperación en investigación y desarrollo sostenible de la región del bajo Lempa, El Salvador: experiencia piloto de restauración de los bosques de ribera” del 2018, se estableció un manual de reforestación con bambú en el bajo Lempa con el objetivo de orientar a los productores y tomadores de decisiones en el manejo del bambú (Andries et al., 2018) describiendo la silvicultura del mismo en las siguientes etapas:

#### **a) Propagación**

Los métodos de propagación del bambú pueden ser sexuales o asexuales. El único método de propagación sexual es el uso de semillas. Un factor muy importante para tener en cuenta es que es muy difícil conservar las semillas de bambú y el mínimo error en la humedad ambiental a la que se conservan puede reducir su viabilidad. Es un método costoso debido a la cantidad de esfuerzo que se debe poner para lograr plántulas que luego deben ser transferidas al terreno; además, el ciclo de floración de varias especies de bambú es muy largo, así que es más común utilizar métodos de propagación asexual (Akinlabi et al., 2017).

Los métodos asexuales son más diversos y entre ellos encontramos:

##### **i. Rizomas con segmento de tallo**

Este método requiere que el culmo cortado tenga de tres a cinco nudos contando desde abajo y entre uno o dos años. El corte al culmo se hace de manera ligeramente oblicua y se procede a separar con cuidado el rizoma y a extraerlo del suelo; hay que comprobar que el rizoma no esté podrido presionando ligeramente. Es

preferible intentar mantener la humedad del suelo mediante bolsas situadas en la base del culmo mientras éste se transporta (Akinlabi et al., 2017).

Para asegurar una mayor tasa de supervivencia se recomienda que se plante a inicios de la estación húmeda, con cuidado de despejar la zona de malas hierbas y otras plantas que puedan competir por nutrientes. La tasa de supervivencia se estima en un 50% en caso de sequía, donde además se debe suplir la falta de agua mediante riego (Akinlabi et al., 2017)

La principal limitante de este método es que es muy laborioso, tanto en la extracción como luego en la plantación; por eso mismo no es muy recomendable para plantaciones a gran escala.

## **ii. Segmentos de culmo**

Recomendable para la propagación de especies de bambú de gran tamaño (8 – 12 cm diámetro), pared gruesa y rizomas paquimorfos (Akinlabi et al., 2017). Este método puede dar lugar a varios brotes.

Se utilizan culmos de un año, y segmentos de culmo con uno o dos, hasta tres nudos, seleccionados entre la base hasta la mitad del culmo, con los cortes 5 cm por debajo del siguiente nudo. La plantación se debe de hacer en horizontal a 15 – 20 cm de profundidad con riego dos veces al día, preferiblemente ligeramente tapados del sol. A partir de la segunda o cuarta semana se pueden ver los nuevos brotes (Akinlabi et al., 2017).

La aplicación de fungicidas e insecticidas no se debe realizar antes de los seis meses, debiendo estar comprendida en un lapso entre los seis y los doce meses después de transplantados (Londoño 2002).

Este método tiene la limitación de utilizar culmos de un año que podrían ser utilizados para otros propósitos, y tiene también un coste bastante alto.

### **iii. Segmentos de ramas**

Es un método útil, práctico y efectivo, además de ser fácilmente manejable; es ideal para especies de los géneros *Dendrocalamus* y *Bambusa*. El enraizamiento es más eficiente en un medio de cascarilla de arroz y carbón y depende de la especie y grosor de la pared, siendo favorecidas aquellas especies que poseen estas cualidades, especialmente si tienen ramas gruesas (Londoño 2002).

La supervivencia mediante este método es del 50%. En la mayoría de los casos, cuidar la rama para que eche raíces toma de seis a doce meses y después el crecimiento de rizoma puede tardar entre doce y veinte meses, que es cuando ya sería capaz de producir culmos (Akinlabi et al., 2017).

### **iv. Segmentos de rienda o gancho**

El material para propagación son las ramas con espinas que se desarrollan en los entrenudos bajos del culmo llamadas riendas o ganchos. Esto obviamente sólo es posible en el caso de especies como *Guadua angustifolia*, que son las que tienen espinas.

Se utiliza una estructura que usualmente se desaprovecha y además presenta un alto porcentaje de prendimiento.

### **b) Siembra**

Para plantaciones comerciales se recomiendan distancias de siembra más amplias entre surcos que entre plantas para asegurar una mayor incidencia de los rayos solares. En el caso concreto de *Guadua angustifolia* lo ideal son distancias entre surcos de 6 a 10 metros y distancias entre plantas de 3 a 5 metros (Londoño, 2002).

Según Londoño (2002), “en las plantaciones con fines netamente conservacionistas se debe sembrar en barreras con distancias de 4 o 5 metros entre surco y de 2 o 3 metros entre planta. Los hoyos deben de ser amplios, no menores de 40x40x40 cm.

Siempre es importante después de plantar hacer un montículo de tierra alrededor de la planta utilizando los pies. Además, para mantener la humedad, es importante que la superficie del hoyo donde se ha plantado esté ligeramente inclinada en un lado (Akinlabi et al., 2017).

### **c) Mantenimiento**

El mantenimiento de la plantación durante el primer y segundo año es fundamental para la salud de la planta (Akinlabi et al., 2017).

### **d) Relativo al suelo**

Como todo cultivo o especie forestal, requiere de ciertos elementos en el suelo. Ante las deficiencias, se puede suplir en el momento adecuado, pero se debe tener cuidado con los lixiviados y los productos que se utilizan.

En el cultivo de *Guadua angustifolia* se utiliza glifosato, urea, superfosfato triple y muriato de potasio (Torres et al., 2013). Sin embargo, está comprobado que también se puede usar hummus de lombriz y las tasas de supervivencia de tratamientos con fertilizantes orgánicos, son del 100% después de un año de plantación, pero esta alta supervivencia se puede atribuir a la calidad de los viveros y no a la aplicación de fertilizantes orgánicos o no (Fernandez et al., 2003).

También, es importante mantener la humedad del suelo, especialmente durante la época seca; de esta manera también se mejora la capacidad de retención del suelo. Para corregir la aireación del suelo y su temperatura, además de mantener las malezas a raya se recomienda ahuecar la tierra dos o tres veces al año por planta (Akinlabi et al., 2017)

#### **e) Relativo a la limpieza**

Las malas hierbas compiten con el bambú no sólo por la luz solar sino también por agua y nutrientes, por eso es importante mantener los alrededores de la planta limpios, hasta un metro, para que el rizoma se pueda establecer sin problemas (Akinlabi et al., 2017). Conforme el bambú crece también empieza a perder hojas, que a su vez impiden que más maleza crezca, por lo que el control dejará de ser tan estricto en las fases más maduras de la planta.

La *Guadua angustifolia* puede asociarse con frijol, maíz, soja, cilantro u otros cultivos durante los dos primeros años de cultivo (Londoño 2002); así se mantiene la plantación libre de malezas, se logra un ingreso extra para el agricultor y además las fabáceas son excelentes fijadoras de nitrógeno.

#### **f) Aprovechamiento**

El ciclo de corte y la intensidad de este son factores clave en el aprovechamiento de un bosque de bambú. Londoño (2002) dice al respecto que “la explotación sistemática y regular incrementa la producción de culmos y facilita la cosecha, mientras que la explotación excesiva y continua reduce la producción y conduce a la extinción del cultivo”, un fenómeno bastante común en el manejo de cualquier bosque tradicional.

En un máximo de siete años *Guadua angustifolia* es capaz de producir culmos de interés comercial. La intensidad de entresaca ideal es de hasta del 50% de su población de culmos comerciales, con una periodicidad de doce a dieciocho meses, para un mismo sitio (Londoño 2002).

#### **g) Elección de culmos**

El bambú aprovechable es aquél que se encuentra en estado “maduro”; de lo contrario, se estaría cosechando un culmo que no tiene el máximo de las propiedades físico-mecánicas de la especie. La mala elección de culmos a la hora de

cosechar es uno de los principales motivos por los que muchas estructuras de bambú fallan, el otro siendo la falta de curación. Aun así, los culmos jóvenes (Figura 1.2), verdes, pueden ser utilizados para canastos o esteras, es decir, aplicaciones que no requieran soportar una estructura.

Un culmo maduro tiene un color grisáceo debido a los abundantes líquenes que han crecido en su superficie.

#### **h) Preservación del bambú**

Debido a que el bambú es vulnerable a ataques de diversos insectos (termitas especialmente) y hongos es importante tratarlo para evitar en la medida de lo posible las plagas. El proceso de conservación del bambú podría dividirse en el secado, y la preservación como tal.

El principal objetivo del secado es reducir el contenido de humedad del culmo hasta un 12% (Akinlabi et al., 2017). Para ello existen dos métodos: secado al aire y secado al horno.

El secado al aire se practica desde hace siglos, consistiendo simplemente en dejar secar el bambú utilizando las condiciones ambientales. Por supuesto, es un método barato, pero el bambú puede tardar desde semanas hasta meses en llegar al contenido de humedad deseado, particularmente en regiones tropicales o subtropicales (Akinlabi et al., 2017). Además, durante ese largo periodo de secado puede ser susceptible a ataques por parte de hongos. Los culmos pueden secarse tanto en horizontal como en vertical, aunque en horizontal tardan más, y sólo es necesario que estén bien aireados y expuestos a aire circulante. Una manera de acelerar el proceso es partiendo el culmo a la mitad o en tiras.

En el secado al horno los culmos se encuentran dentro de una cámara a la cual se le inyecta calor, de manera que este proceso es mucho más rápido.

Es muy recomendable para grandes volúmenes de culmos. Las técnicas de preservación del bambú se centran en reducir el contenido de almidón y otros azúcares lo máximo posible.

### 1.2.2 Características morfológicas de la *Guadua angustifolia*

La *Guadua angustifolia* es fácilmente identificable por los cortos entrenudos anillados con una amplia banda blanca y espinosas ramas (Somen et. al., 2011).



Culmo nuevo

Culmo joven

Culmo adulto

Culmo seco

**Figura 1.2. Características externas de los tallos de *Guadua angustifolia* según la edad (Londoño et al., 2002)**

Los tallos de la *Guadua angustifolia* tienen una altura media de 15-25 m y un diámetro de 9-13 cm. Sin embargo, se han registrado diámetros de hasta 25 cm y alturas de hasta 35 m, lo que hace de la *Guadua angustifolia* la tercera especie de bambú más grande del mundo. Normalmente se tarda entre 6 y 8 años después de la plantación en producir tallos de tamaño medio, pero en condiciones perfectas, los tallos de 12 cm de diámetro podrían empezar a aparecer ya en el 4º año (Schröder,

2014). Alcanza su madurez para ser cosechada a los 4 o 5 años. Se ha observado un crecimiento diario de 21 cm de altura. Si se maneja correctamente, puede tener una producción ilimitada sin necesidad de mucho cuidado (Maxwell y MacLeod, 2014).

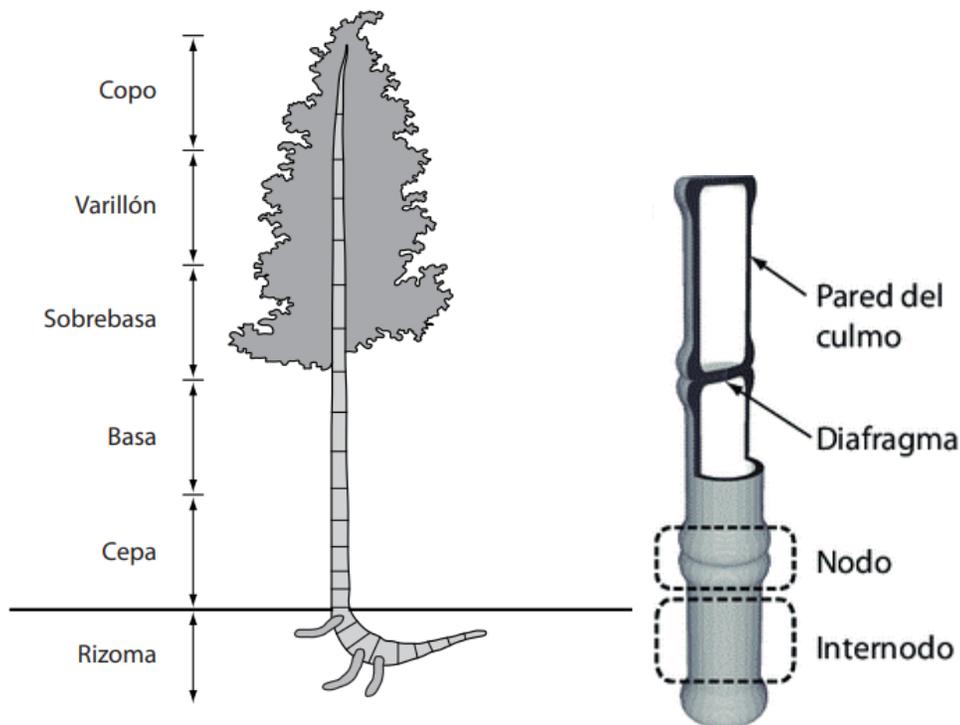


Figura 1.3 Partes del bambú (Estrada, 2010)

#### a) Copo

Parte apical de la guadua con una longitud de 1.20 – 2.00 m y usa como en el suelo del guadual como aporte de materia orgánica (González Yebra, 2014).

Las hojas de la *Guadua angustifolia* tienen forma de lanza y en promedio miden 13-21 cm de largo por 14-32 mm de ancho. Son lisas en la superficie superior y presentan pelos blancuecinos en el envés. En un tallo adulto hay entre 14,000 y 20,000 hojas que generan una superficie foliar de aproximadamente 53.5 m<sup>2</sup> (Schröder, 2014).

#### **b) Varillón**

Sección de menor diámetro de aproximadamente 3 metros, se usa en la construcción como correa de techos con tejas de barro o de paja. Se emplea como tutor en cultivos transitorios (González Yebra, 2014).

#### **c) Sobrebasa**

Es un tramo de guadua con buen comercio debido a su diámetro que permite un uso variado y posee una longitud de aproximadamente 4 metros, utilizado como elemento de soporte en estructuras de concreto de edificios en construcción. También se emplea como viguetas para formaletear planchas y como postes de espelderas en cultivos (González Yebra, 2014).

#### **d) Basa**

Parte de la guadua que mayores usos tiene, debido a su diámetro intermedio. Esta sección más comercial de la aguadua. La longitud es de 8 metros aproximadamente. De esta sección se elabora generalmente la estenilla, la cual tiene múltiples usos en construcción de paredes, casetones y formaletas de planchas. Esta parte se utiliza como vigas y columnas en construcciones nuevas de guadua (González Yebra, 2014).

#### **e) Cepa**

Sección basal de mayor diámetro del culmo (González Yebra, 2014).

#### **f) Rizoma**

El rizoma es la parte subterránea del culmo y es importante en el almacenamiento y la distribución de nutrientes, así como en la reproducción asexual (Maxwell y MacLeod, 2014). La *Guadua angustifolia* suele considerarse un bambú en expansión, ya que sus rizomas pueden alcanzar longitudes de entre 1 y 2.5 m y cada uno

puede producir hasta 4 culmos dentro de su periodo reproductivo de 4 años (Schröder, 2014).

#### **g) Nudo**

Banda o anillo que se va presentando a lo largo del culmo dejando una distancia entre 15 y 30 cm (Chiluiza et al., 2009). A medida que los nudos estén más cercanos entre sí, ayudarán al tallo a responder de mejor manera ante esfuerzos de flexión, otorgándole una mayor resistencia (Medranda et al., 2011)

#### **h) Entrenudo**

El entrenudo es el espacio que hay entre los nudos en el tallo. Su distancia varía entre 15 y 30 centímetros, siendo de una longitud menor en la base y de una longitud mayor a medida que va creciendo (Gonzales Mora, 2003). Un culmo de *Guadua angustifolia* de 20 m de altura cuenta un total de 75 entrenudos (Schröder, 2014).

### **1.2.3 Características lignocelulósicas de la *Guadua angustifolia***

La biomasa lignocelulósica (maderera y no maderera) es el material renovable más abundante del mundo, y sus tres componentes principales son la celulosa, la hemicelulosa y la lignina (Ardila et al., 2020), en menor proporción también presenta componentes de bajo peso molecular: los extractos orgánicos y las cenizas o minerales inorgánicos (Santos Meneses, 2018). La celulosa, hemicelulosas y lignina son los principales constituyentes de la pared celular de fibras de plantas. Por lo tanto, la morfología de las fibras depende de la composición y la organización estructural de los mismos (Prinsen, 2010).

#### **a) Celulosa**

La celulosa es el biopolímero más abundante en la Tierra, consiste en cadenas lineales de celobiosa (D-glucopiranosil- $\beta$ -1,4-D-glucopiranososa) (Prinsen, 2010),

compuesto por unidades de D-glucosa unidos mediante enlaces  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 4) glucosídicos. El grado de polimerización (GP) medio de las celulosas nativas varía entre 8,000 y 10,000 unidades. Presenta una estructura lineal que facilita los enlaces de hidrógeno intra- e inter-moleculares entre los grupos hidróxilos, provocando la agregación de cadenas de celulosas en fibrillas elementales con un alto grado de cristalinidad. Estas fibrillas elementales se conforman con la unión de 30 a 100 cadenas de celulosa mediante puentes de hidrógeno (Santos Meneses, 2018).

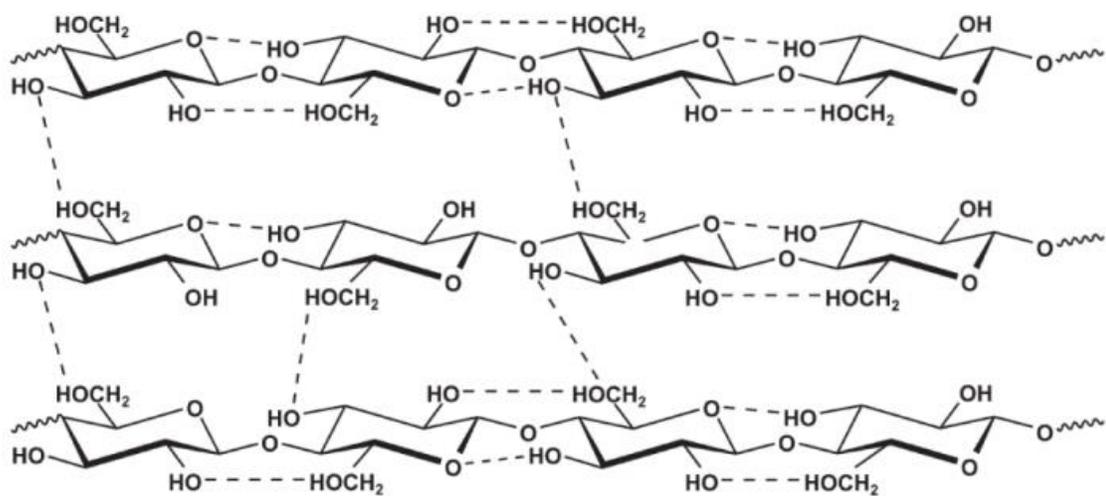


Figura 1.4. Estructura de la celulosa (Santos Meneses, 2018)

### b) Hemicelulosa

La hemicelulosa es un heteropolisacárido que se compone de hexosas (glucosa, manosa y galactosa), pentosas (xilosa y arabinosa) y ácidos urónicos (glucurónico y 4-O-metil-glucurónico). A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa es un polímero amorfo, irregular y ramificado, cuyas cadenas presentan un grado de polimerización entre 50 y 250. Además, posee grupos laterales como los grupos acetilo (Santos Meneses, 2018).

En maderas blandas, los principales constituyentes son los galactoglucomananos, los arabinoglucuronoxilanos y los arabinogalactanos. Los más importantes son los

galactoglucomananos, que pueden llegar a suponer el 25 % de la madera en base seca (Santos Meneses, 2018).

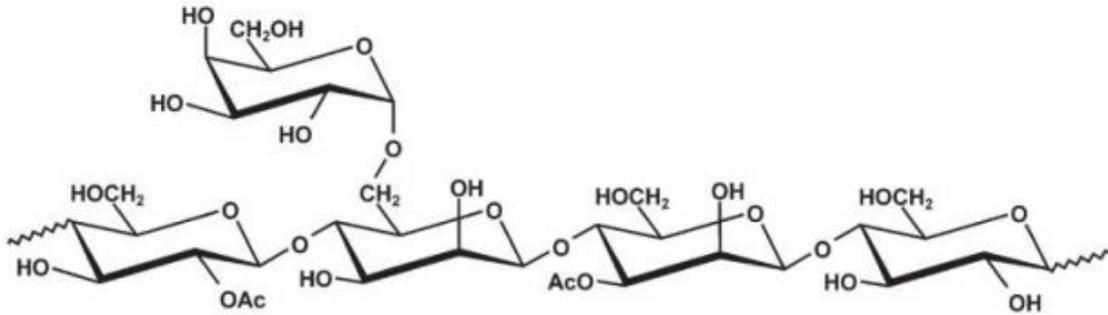


Figura 1.5. Glucomanano presente en maderas blandas (Santos Meneses, 2018)

En maderas duras, los polisacáridos más frecuentes son los glucuronoxilanos, los glucomananos y los xiloglucanos. Si se refiere a monómeros, la manosa predomina en las maderas blandas y la xilosa en maderas duras (Santos Meneses, 2018).

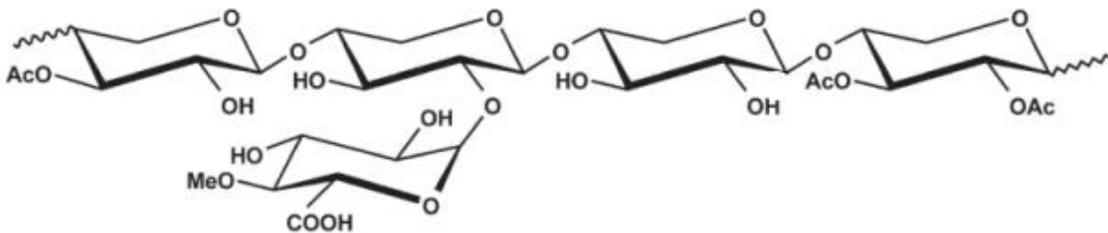


Figura 1.6. Xilano presente en maderas duras (Santos Meneses, 2018)

### c) Lignina

La lignina es el segundo polímero natural más abundante y uno de los recursos renovables más importantes, tiene una gran variedad de aplicaciones industriales como adsorbentes, adhesivos, dispersantes o aglutinantes. Este constituyente de la

madera es un polímero amorfo y complejo que cementa las fibras de celulosa, proporciona la rigidez a la pared celular y actúa como barrera contra la degradación microbiana o fúngica de las fibras de celulosa, está formada por monómeros de fenilpropano unidos por enlaces carbono-carbono o carbono-oxígeno. Sin embargo, la estructura química de la lignina aún no está definida, ya que varía dependiendo de su método de extracción.

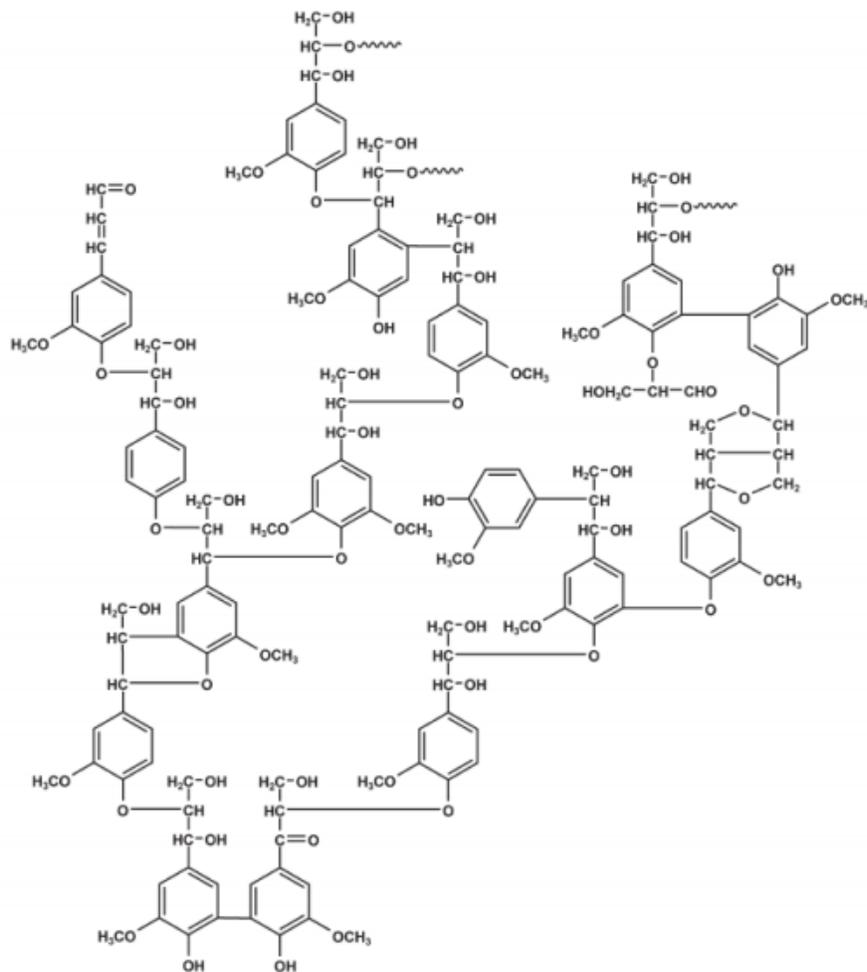
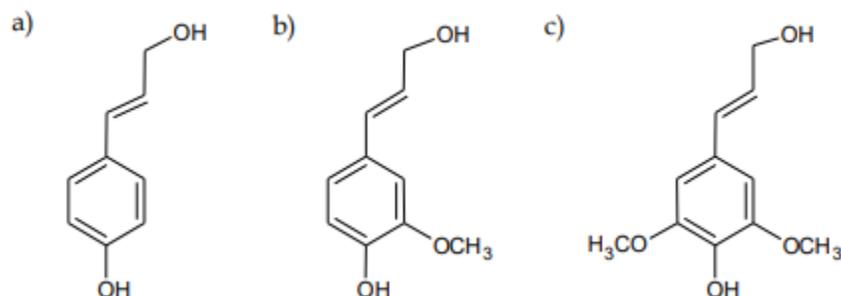


Figura 1.7. Estructura de la lignina de madera blanda (Santos Meneses, 2018)

Las unidades monoméricas de fenilpropano difieren en el grado de sustitución del anillo aromático, siendo así los alcoholes cumarílicos sin sustituir (a), los coniferílicos con un grupo metoxilo (b) y los sinapílicos con dos grupos metoxilos (c).



**Figura 1.8. Precursores de la lignina (Santos Meneses, 2018)**

La biodegradabilidad de lignina es de gran importancia en la producción de pasta de papel, ya que la lignina más persistente resulta en más lignina residual, lo que baja el rendimiento de la separación de celulosa y consecuentemente la calidad del papel (Prinsen, 2010)

#### **d) Extractos y cenizas**

Los componentes minoritarios (1-10%) de la madera son los extractos y las cenizas. Estos compuestos son muy variados, entre los que se incluyen: quinonas, grasas, aceites, terpenos, ceras y compuestos fenólicos como estilbenos, lignanos, flavonoides o taninos. Pueden ser extraídos con disolventes orgánicos tales como etanol, acetona, diclorometano o incluso agua. Las cenizas se componen de sustancias inorgánicas que permanecen tras la incineración de la madera como potasio, calcio, magnesio o sodio. El contenido de cenizas supone entre 0.2 y 0.5% en maderas de climas templados y se incrementa hasta el 1% en maderas tropicales (Santos Meneses, 2018).

Diferentes estudios han determinado la composición lignocelulósica de la *Guadua angustifolia* dando como resultado porcentajes (con un promedio del 51.25%) bastante variados en su composición a pesar de ser la misma especie, ya que esta depende de todo el ciclo de crecimiento y el mantenimiento que ha recibido la planta.

**Tabla 1.1. Contenido lignocelulósico del bambú *Guadua angustifolia***

Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Extractos (%)	Fuente
60.83	71.39	15.21	-	(Estrada, 2010)
52.6	19.7	27.6	7.3	(Ardila et al., 2020)
44.49	10.18	24.95	6.57	(Césare et al., 2019)
47.06	11.82	21.88	6.47	(Cuéllar y Muñoz, 2009)

Otras especies de bambú presentan similar contenido de lignina y celulosa, sin embargo, su caracterización no siempre incluye todos los componentes.

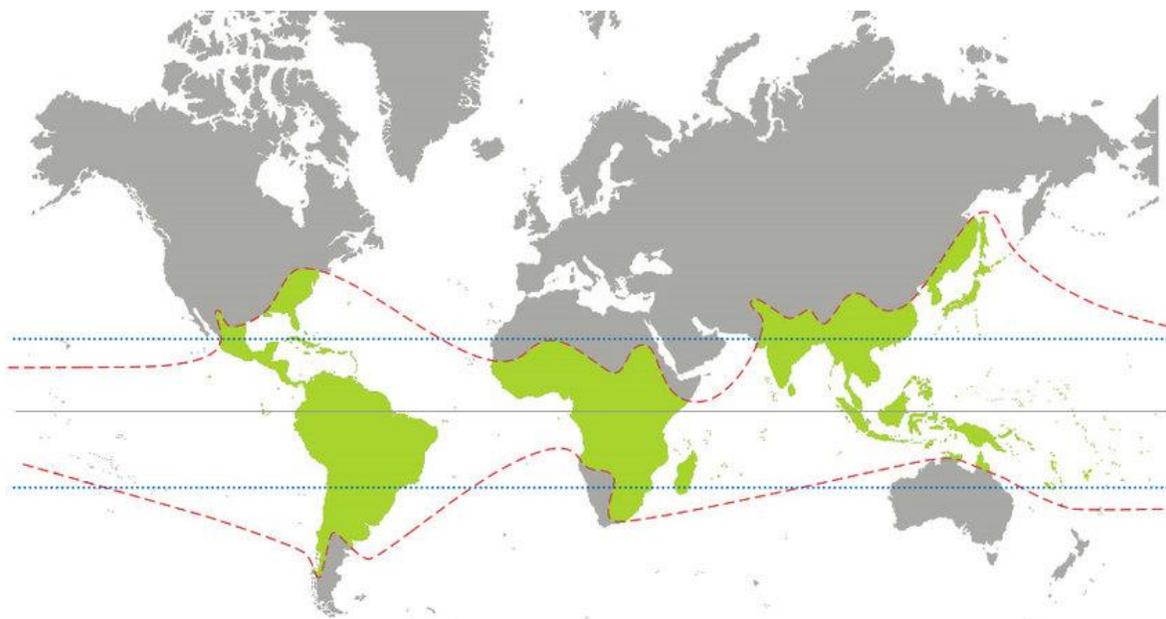
**Tabla 1.2. Contenido lignocelulósico de otras especies de bambú**

Especie	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)	Fuente
<i>Gigantochloa aspem</i>	61.3	-	25.5	(Estrada, 2010)
<i>Gigantochloa levis</i>	62.9	-	24.2	(Estrada, 2010)
<i>Whange</i>	54.45	17.78	23.22	(Estrada, 2010)
<i>Yunnanicus</i>	52.7	17.58	25.52	(Estrada, 2010)
<i>Guadua Amplexifolia</i>	50.1	27.5	22.4	(Ardila et al., 2020)
<i>Dendrocalamus latiflorus Munro</i>	57.8	23.8	18.4	(Ardila et al., 2020)

Como referencia también se presenta el contenido lignocelulósicos de las maderas duras, maderas blandas entre otras fuentes de biomasa de interés industrial en el anexo 1.

#### 1.2.4 Distribución del bambú en el mundo y América Latina.

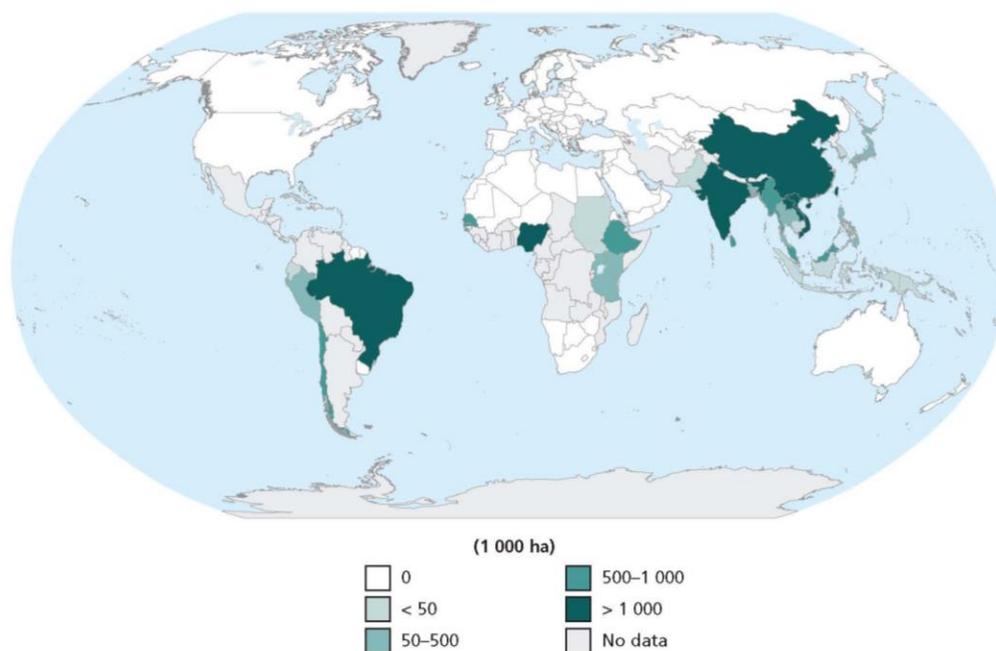
Existen alrededor de 1,200 especies de bambú en unos 90 géneros. El bambú se distribuye naturalmente en el cinturón tropical y subtropical entre aproximadamente 46° norte y 47° de latitud sur, y se encuentra comúnmente en África, Asia y América Central y del Sur, aunque algunas especies también pueden crecer con éxito en zonas templadas suaves de Europa y América del Norte (FAO, 2007).



**Figura 1.9. Hábitat natural del bambú (Hebel et al., 2015)**

Las mayores áreas con bambú se encuentran en China con aproximadamente 25 millones de hectáreas seguido por Sur América con más de 5 millones de hectáreas, mientras tanto para Centro América no se reportan registros (FAO, 2020).

Para el año 2010 se reportó una su superficie total mundial de más de 30 millones de hectáreas (FAO, 2010). Actualmente, se estima que la superficie total de bambú en el mundo es de más de 35 millones de hectáreas. La superficie total del bambú aumentó en casi un 50% entre 1990 y 2020, en gran parte debido a los aumentos en China y la India (FAO, 2020).



**Figura 1.10. Área con bambú por país (FAO, 2010)**

En América Latina se concentra la diversidad de bambú leñoso de América con un 39% de especies y el 31% de géneros de todo el mundo, estos se distribuyen desde aproximadamente 27° Norte a 47° de latitud sur. En general, el uso del bambú en América Latina se limita al uso local de especies cercanas y solamente en Colombia, Ecuador y Brasil el bambú es un rubro destacado en su economía. Por ejemplo, Brasil ha desarrollado la industria de papel de bambú y generación eléctrica con el uso de biomasa (Añazco, 2013).

### **1.2.5 Usos y productos del bambú**

El bambú se ha desarrollado como una especie excepcionalmente valiosa y a menudo superior sustituto de la madera. El bambú puede sustituir a la madera en muchas aplicaciones industriales y así contribuir a la conservación y restauración de los bosques del mundo (FAO, 2007). Desde los años 90, las nuevas tecnologías de procesamiento han permitido la separación del bambú en tiras, láminas, fibras y para su uso en varias industrias de productos básicos, como la de la pulpa, el papel, los textiles, los gránulos y las partículas materiales de construcción (INBAR, 2019).

A pesar del uso de resinas, laminados y pegamentos para la creación de algunos productos, muchos materiales de bambú duradero son todavía una alternativa preferible, más "circular", a los materiales abióticos. Casi todas las partes de la planta de bambú, así como los productos de bambú al final de su vida útil, pueden ser procesados para formar varios tipos de energía basada en la biomasa, incluyendo carbón, pellets y gas, para su uso en la cocina, la calefacción y la electricidad (INBAR, 2019).

#### **a) Viviendas de bambú**

Existen tres tipos principales de viviendas de bambú: casas tradicionales, que utilizan los tallos de bambú como material de construcción primario; casas de bajareque con bambú tradicionales, en las que un marco de bambú es enyesado con cemento o arcilla; y casas modernas prefabricadas, hechas de tablas laminadas de bambú, chapas y paneles (FAO, 2007).

Estas construcciones suelen ser más baratas que las casas de madera, ligeras, fuertes y resistentes a los terremotos, a diferencia de construcciones de ladrillo o cemento. Los nuevos tipos de casas prefabricadas hechas de bambú de ingeniería tienen ciertas ventajas. Pueden ser empaquetados en plano y transportados a largas distancias a un costo razonable (FAO, 2007).

### **b) Postes de bambú**

Duraderos, flexibles, bajos en carbono y autorrenovables, los postes de bambú son algunos de los materiales disponibles más sostenibles, con una huella de carbono de cuna a puerta de sólo 0.20 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg/poste cuando se usa localmente. El bambú también está disponible en abundancia y a bajo costo, convirtiéndolo en una opción tradicional de material de vivienda para muchas comunidades pobres (INBAR, 2019).

### **c) Materiales de ingeniería**

El desarrollo de los materiales de ingeniería de bambú ha transformado el potencial del bambú para uso estructural. Se pueden utilizar varios procesos para transformar los postes de bambú en productos similares a la madera de estabilidad y forma estandarizada, como aplanado, laminado o compresión (INBAR, 2019). Estos pueden reemplazar a la madera, el acero y el hormigón en muchos usos (FAO, 2007).

Las tablas de bambú térmicamente modificadas y densificadas pueden a veces superar a la madera dura en términos de durabilidad para aplicaciones en exteriores. El bambú laminado tiene una rigidez relativamente baja y una gran flexibilidad, es famoso por "doblar pero no romperse", con mayor resistencia en los terremotos. Los paneles de bambú pueden ser tratados con biocidas para hacerlos más duraderos para su uso en el exterior (INBAR, 2019). Los paneles se utilizan ampliamente en la construcción moderna como elementos o como formas para molduras de hormigón. También se utilizan para suelos, techos, tabiques, puertas y los marcos de las ventanas. Los paneles de bambú tienen algunas ventajas sobre las tablas de madera debido a su rigidez y la durabilidad (FAO, 2007).

#### **d) Compuestos de fibra larga**

Los compuestos de bambú creados con segmentos de fibra larga son particularmente fuertes y pueden ser moldeados en diferentes tipos de forma, a diferencia de los materiales de ingeniería estos tienen una gran un mayor contenido de resina sintética, a menudo superior al 30% (INBAR, 2019).

Un material compuesto básico basado en el bambú es el tablero de alfombras de bambú, que se hace sumergiendo hojas de tejido de bambú en resina, después del cual son prensados en caliente y curados para formar tablas duras y ásperas adecuadas para diversas aplicaciones, como paletas, fundición de hormigón, construcción, contenedores de transporte o tablas onduladas para el techo. Los compuestos de fibra larga de bambú también tienen más aplicaciones masivas de alta calidad: son aplicables en industrias en las que el peso ligero, la libertad de forma y la fuerza son atributos clave, como la automotriz, aeroespacial, náutico, de equipamiento deportivo, construcción e infraestructura (INBAR, 2019).

#### **e) Muebles**

los productos industriales de bambú pueden ser un sustituto más sostenible incluso para las maderas duras de origen sostenible, si estos no se combinan con sintéticos adhesivos y/o lacas, sino hechos con elementos biológicos desmontables (por ejemplo, clavijas de bambú) y componentes reutilizables de tecno-ciclo (como tornillos y pernos) (INBAR, 2019).

#### **f) Artículos para el consumidor**

La enorme variedad de tecnologías de procesamiento del bambú significa que hay muchas oportunidades para crear diferentes productos, como reemplazo de muchos materiales abióticos tradicionales, incluyendo al plástico. Se pueden producir una amplia gama de bienes de consumo: desde bolsas de un solo uso, hasta pajillas, vajilla, tazas y cubiertos, hasta productos más duraderos, incluyendo estuches para teléfonos y computadoras portátiles, relojes, gafas, artículos de cocina, artículos

deportivos como cascos, bicicletas y patinetas, en salud y belleza productos como cepillos de dientes de bambú e hisopos de algodón (INBAR, 2019).

#### **g) Productos de bambú para tejer y artesanías**

Hay casi 20 categorías de tejidos productos de bambú en Asia, como cestas de frutas, bandejas, botellas, tarros, cajas, estuches, tazones, ventiladores, pantallas, cortinas, cojines, pantallas de lámparas y linternas (FAO, 2007).

#### **h) Papel y pulpa**

Debido a su alto rendimiento, sus largas fibras y sus buenas propiedades mecánicas, el bambú puede ser un buen material para su uso en la industria del papel y el cartón (INBAR, 2019). El papel de bambú tiene prácticamente la misma calidad que el papel hecho de madera. Su brillo y las propiedades ópticas permanecen estables, mientras que las del papel hecho de madera pueden deteriorarse con el tiempo. La calidad del papel de bambú puede ser mejorada mediante el refinamiento de la pulpa (FAO, 2007).

Sin embargo, especies de rápido crecimiento son comúnmente usadas en la producción de papel por lo que reemplazar estas especies por bambú no es un cambio tan radical en términos de economía circular, en la que se prefiere sustituir materiales abióticos por materiales bióticos (INBAR, 2019).

#### **i) Textiles**

Hay varios tipos de textiles de bambú, de los cuales el bambú viscosa puede ser el más popular en el mercado. Para producir viscosa a base de bambú, la pulpa de bambú se crea utilizando la pulpa de celulosa tradicional para producir viscosa para la posterior producción de textiles de bambú. Después de lavar, blanquear y secar, las fibras finales pueden ser hilados para producir eventualmente varios tipos de tejidos de bambú. En las prendas finales, el hilo de bambú se suele combinar con otros materiales, como el algodón, para hacer la tela más resistente (INBAR, 2019).

### **j) Bioenergía y subproductos**

Por medio de la pirólisis, el bambú puede convertirse en tres productos valiosos: carbón de bambú, aceite y gas (FAO, 2007), para uso en la cocina, calefacción o electricidad ya que 1.2 kg de bambú puede producir 1 kWh de electricidad, esto es similar a la biomasa requerida por la madera (INBAR, 2019).

Los residuos de bambú pueden convertirse en subproductos en una biorefinería como lo es el biocarbón, carbón activado y carbón vegetal que ya tienen un nicho de mercado en el sector de la salud (INBAR, 2019).

El carbón de bambú se utiliza tradicionalmente como sustituto del carbón de madera o del carbón mineral. El valor calorífico del carbón de bambú es casi la mitad que el del petróleo del mismo peso. El carbón activado de bambú se utiliza como desodorante, purificador, desinfectante, medicina, químico agrícola y absorbente de la contaminación y la humedad excesiva. La capacidad de absorción del carbón de bambú es seis veces la de carbón de madera del mismo peso (FAO, 2007).

### **k) Brotes de bambú**

Aproximadamente 200 especies de bambú pueden proporcionar brotes de bambú comestibles y apetecibles. Los brotes de bambú fresco tienen un alto contenido de fibra, después de la cocción, los brotes siguen siendo crujientes, porque la cocción no destruye su textura. Los brotes de bambú cocidos pueden ser almacenados en contenedores para su comercialización (FAO, 2007).

### **l) Remediación ambiental**

El bambú protege las laderas empinadas, los suelos y las vías de agua, evita la erosión del suelo, proporciona carbono y trae muchos otros beneficios para el ecosistema (FAO, 2007).

En el mercado internacional, las categorías más comunes de productos que se comercializan incluyen productos tejidos de bambú (22%), productos de bambú industrializado (21%), brotes de bambú en conserva (19%), muebles de bambú y ratán (16%), materia prima de bambú y ratán (6%), carbón de bambú (3%), pulpa y papel de bambú (2%), entre otros. Los productos industrializados de bambú, que incluyen el suelo y los paneles de bambú, comprendían los principales en 2017, con un valor de exportación de 360 millones de dólares de los EE.UU (INBAR, 2019).

### **1.3 Bambú en El Salvador**

Los primeros reportes de bambú en El Salvador datan de los años 40's de las investigaciones de Floyd Alonzo McClure, una de las principales autoridades mundiales en la planta de bambú. Durante 1943-1944, realizó un estudio de mercado acerca de los bambús útiles en los Estados Unidos, México, Honduras, Colombia, Venezuela, Brasil y Puerto Rico. En su tiempo como consultor de servicios de campo de bambú (1944-1945) estudió y recolectó bambús de seis países de América Central y del Sur, entre otras zonas y estableció colecciones vivas de especies económicas de alta calidad en Guatemala, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Ecuador y Perú (Govardhan, 2013).

Además, McClure trajo alrededor de 20 especies de bambús asiáticos de Puerto Rico, la Zona del Canal y El Paraíso (Honduras) y las plantó en San Andrés. En los años 90's, el Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal "Enrique Álvarez Córdova" (CENTA) tenía la mayor colección de bambús del país, con 17 especies nativas y bambús exóticos, en su mayoría de las presentaciones de McClure (Londoño, 2001).

A pesar de que El Salvador no reporta áreas con bambú como recurso forestal (FAO, 2020) y algunos estudios presumen que todas las especies están extintas (Londoño, 2001), en 1972 la Misión Técnica de la República de China (Taiwán)

fomentó el cultivo del bambú en El Salvador, importándose grandes variedades de especies para obtener suficiente materia prima. Las primeras plantaciones que se sembraron por parte de la comisión técnica fueron en Sonsonate, Ahuachapán, Chalatenango, Tejutla, Ciudad Arce, Planes de Renderos y Panchimalco. En 1979, dio inicio el primer curso de capacitación sobre la utilización del bambú en forma artesanal realizado en San Marcos, de estas capacitaciones surgieron los primeros artesanos en trabajar el bambú, a la fecha se mantienen activos trabajando estas técnicas don Cástulo Hernández en Nahuizalco y don Harold Orellana en los Planes de Renderos el cual junto a su familia fundo la empresa Arte en Bambú (Ardón Aguilar et al., 2017).

El cultivo y aprovechamiento del bambú se sigue fomentando en el país y en 2015 se llevó a cabo del Primer Foro Nacional de Bambú, donde se presentó al bambú como un recurso útil para familias rurales, actividades artesanas y alimenticia, además de su incorporación en la estrategia ambiental para la adaptación y mitigación al cambio climático, monocultivos y soberanía alimentaria (MAG, 2015).

### **1.3.1 Especies de bambú en El Salvador**

Según el informe de los recursos mundiales de bambú existen 7 especies en El Salvador, ninguna es introducida ni nativa, sino que surgieron de forma natural (FAO, 2005) y no se especifica qué especies son. Sin embargo, según datos del Programa Nacional de Bambú en El Salvador se cuenta con 6 géneros y 11 especies de bambú, entre estas especies se tienen bambús gigantes, medios, enanos, gruesos, delgados, estructurales y ornamentales, la mayoría huecos, algunos sólidos, otros semi sólidos, de habito de crecimiento invasores, sedentarios o estacionarios y semi sedentarios (Ardón Aguilar et al., 2017).

**Tabla 1.3. Géneros y especies de bambú en El Salvador (Ardón Aguilar et al., 2017)**

<b>Género</b>	<b>Especie</b>
<i>Bambusa</i>	<i>Dolichoclada, Longispiculata, Tulda, Ventricosa, Ventricosa (B), Olldhami, Tuldoides, Textiles, Vulgaris</i>
<i>Dendrocalamus</i>	<i>Asper, Estrictus, Latiflorus</i>
<i>Guadua</i>	<i>Angustifolia, Inermis</i>
<i>Gigantochla</i>	<i>Verticillata, Apus</i>
<i>Chusquea</i>	<i>Coronalis</i>
<i>Phyllostachys</i>	<i>Makinoi, Aurea</i>
<i>Rhidipocládum racemiflorum (en estudio)</i>	

Existe esa diversidad de bambúes sin embargo su uso y disponibilidad varía según su especie, ya que cada uno es aprovechado de diferente manera. Además, son pocas las personas que se dedican al cultivo del bambú a pesar de que desde hace años se viene impulsando la utilización del mismo.

### **1.3.2 Disponibilidad de bambús en El Salvador**

Según los registros oficiales del Programa Nacional del Bambú, en el país se tienen sembradas aproximadamente 1,600 manzanas de diferentes especies. Los registros más recientes del Programa datan del 2007 (Ardón Aguilar et al., 2017).

**Tabla 1.4. Cultivos de bambú en El Salvador (Hectáreas) (Ardón Aguilar et al., 2017)**

Nombre	Ubicación	Especies	HA
ECOCENTRO CESTA	Santa Cruz Michapa, Cuscatlán	<i>Asper, angustifolia, latiflorus,</i> <i>dolichoclada</i>	2.0
Molineros	Verapaz, San Vicente	<i>Asper, latiflorus</i>	0.5
Tecomatepeque	Guayabal, Cuscatlán	<i>Asper</i>	1.0
Carretera antigua	Nejapa, San Salvador	<i>Angustifolia</i>	3.0
Espíritu Santo	Santiago Nonualco, La Paz	<i>Asper, Strictus</i>	1.0
Finca La Vega	Tecapán	<i>Asper, angustifolia, verticillata</i>	1.0
Finca El Milagro	Izalco, Sonsonate	<i>Asper, angustifolia</i>	1.0
El Cachal	Jayaque, La Libertad	<i>Asper, dolichoclada,</i> <i>Longispiculata makinoi</i>	2.0
FOMILENIO	Las vueltas, Chalatenango	<i>Asper, dolichoclada</i>	5.0
Región Jiboa		<i>Asper, angustifolia</i>	5.0
		<b>Total</b>	<b>21.5</b>

### 1.3.3 Usos del bambú y productos de bambú en El Salvador

Cada especie de bambú tiene sus propias características químicas y mecánicas por lo que en El Salvador se usan y producen de diversas maneras.

#### a) Artesanías y muebles

En El Salvador, mayoritariamente se producen y comercializan artesanías y muebles. Los talleres producen artesanías, porque son más prácticas de elaborar, requiriendo una menor inversión en materiales, tiempo y herramientas, la fabricación de muebles requiere de la utilización de variedades de bambú de fibras duras (asper, guadua, vertisillata, etc.), la cuales para ser trabajadas se requiere del uso

de herramientas eléctricas, por la dificultad que implicaría trabajar este material con herramientas manuales (Ardón Aguilar et al., 2017).

#### **b) Construcción de viviendas**

El Programa Nacional del Bambú ya ha impulsado el bambú en El Salvador para el uso de construcción de viviendas con *Dendrocalamus asper* y *Guadua angustifolia* (Widmer, 1990). Cáritas El Salvador, Fundación de la Iglesia Católica, también ha trabajado en la propagación del bambú y a la ejecución de programas de beneficio social en el cual se han elaborado casas hechas de bambú (Ardón Aguilar et al., 2017).

Por otro lado, de manera comercial sólo la empresa “Arte en Bambú” ha ejecutado proyectos que van desde la decoración de interiores hasta la construcción de casas de campo. Sin embargo, la frecuencia de estos proyectos ha sido ocasional, en aproximadamente seis años de labores la empresa solo ha construido 5 casas de campo elaborados a base de bambú (Ardón Aguilar et al., 2017).

#### **c) Cultivo por beneficios ambientales**

Los productores que poseen bambú en sus fincas en El Salvador valoran este recurso primordialmente por los servicios ambientales que provee a las fincas; tanto en la conservación de suelos, protección de cultivos contra el viento, sombra y regulación hídrica; lo cual coincide con el uso que se le ha dado al bambú en otros países en donde la utilización del bambú ha sido dirigida al aporte ambiental que provee en los terrenos. También Pro-Vida, Asociación Salvadoreña de Ayuda Humanitaria, a focalizado su ayuda en la utilización del bambú como recurso para la protección de mantos acuíferos (Ardón Aguilar et al., 2017).

### **1.3.4 Usos potenciales según la especie de bambú**

En el apartado anterior se presentaron los usos y productos que actualmente se hacen en El Salvador sin embargo, el uso potencial de las especies de bambú existentes en El Salvador es mucho más amplio:

#### **a) Bambusa dolichoclada**

Artesanías, se usa con mayor frecuencia para tejidos y tutores de agricultura.

#### **b) Bambusa Longispiculata**

Es utilizado mundialmente para la estabilización de suelos, control de corrimientos de agua, supresión y captura del polvo, también para la fabricación de bio carbón.

#### **c) Bambusa Tulda**

Los brotes jóvenes son comestibles, pero el sabor ligeramente amargo, por lo tanto, a menudo se conservan en vinagre, los tallos se utilizan generalmente para la construcción, andamios, muebles, cajas, cestas, esteras, utensilios para el hogar, la artesanía y como materia prima para la pasta de papel.

#### **d) Bambusa Ventricosa**

Esta especie es comúnmente utilizada para decoración ya que posee una forma curva en los entrenudos denominada “pansa de burro”. Su uso depende de la característica ya que puede tener entrenudos largos o cortos. Es utilizada como ornamento o bonsái, artesanías. Se utiliza para fines decorativos como bases de lámparas, patas de muebles, entre otros.

#### **e) Bambusa Oldhamii**

Es una especie de bambú comestible (retoños) y es la única que puede comerse fresca y cruda. Tiene alto porcentaje de fibra y se utiliza mucho para la elaboración de sopas y ensaladas.

**f) Tuldoiedes**

Se utiliza principalmente para la construcción, muy frecuentemente en la fabricación de cercas y se plantan en el borde de las carreteras para utilizarlos como barrera acústica.

**g) Bambusa Textilis**

Se utiliza principalmente para la elaboración de cercos naturales, tejidos artesanales, cortinería, jardinería y artesanías.

**h) Bambusa Vulgaris**

Conocido convencionalmente como “bambú amarillo” con las líneas verdes. Este bambú es de poco uso convencional y lo utilizaban comúnmente para tutores de agricultura o elaboración de tejidos con un acabado muy rústico.

**i) Dendrocalamus Asper**

Esta especie es la más recomendada por sus múltiples beneficios para la construcción de viviendas, puentes, cercas, columnas, revestimientos, esterillas, etc. Puede llegar a crecer alrededor de 10 a 15 nudos en 20 días. También es utilizado para fabricación de laminados en países como Ecuador.

**j) Dendrocalamus strictus**

Es una especie que se caracteriza por ser sólida completamente y se utiliza para la elaboración de muebles y artesanías y de artículos deportivos.

**k) Dendrocalamus latiflorus**

Es otro tipo de bambú comestible y se encuentra la mayoría de veces como enlatados y empaques en agroindustria. Es utilizado en alimentos como sopas y sus hojas se utilizan para la elaboración de los tradicionales tamales chinos o licor.

#### **l) Guadua Angustifolia**

Esta especie tiene características especiales. Es utilizada para la construcción y su cultivo es el doble de lento que *D. asper*. A partir del tercer año aparecen unas manchas de color café y hongos característicos de esta especie y la fibra es muy suave. Posee espinas en sus nudos lo cual dificulta el manejo y su caña es de grosor irregular (delgado, grueso y delgado). Esta especie es ideal para la reproducción en vivero, pero no es recomendable para la transformación industrial por la suavidad de fibra.

#### **m) Guadua Inermis**

Sus cañas son utilizadas en la construcción principalmente para postes y elaboración de galeras y ranchos.

#### **n) Gigantochloa Verticillata**

Es una especie muy utilizada para artesanías, tejidos, muebles y además como refuerzo para construcciones sin embargo no es su uso principal.

#### **o) Gigantochloa Apus**

Esta especie se utiliza para elaboración de muebles, tejidos y artesanías y su superficie es característica por tener muchos “pelitos”.

#### **p) Chusquea Coronalis**

Para muchos amantes de bambú es considerado el más hermoso de bambú en el cultivo. Un maravilloso espécimen para contenedores, especialmente alrededor de una característica estanque o agua. Generalmente se utiliza para decoración de jardines.

#### **q) Phyllostachys –Makinoii**

Se utiliza para realizar artesanías y muebles y además es comestible de forma cocida y puede ser utilizado además para la transformación industrial en laminados.

Posee un aceite natural que es característicos de los *Phyllostachys* que le da brillo en su acabado final.

#### **r) *Phyllostachys Aurea***

Esta especie posee características similares al *P. Makinoii* y además de entrenudos relativamente pequeños es utilizado de forma ornamental para bonsái y para artesanías y muebles. Posee un aceite natural que le da brillo en su acabado final.

### **1.4 Generalidades de la industria de la pulpa y el papel**

En la industria del papel se utilizan diferentes tipos de materias primas de origen vegetal, esta puede ser materia virgen o recuperada.

#### **1.4.1 Materias primas para la producción de papel**

La mayoría de la fibra usada para papel actualmente proviene de madera que ha sido cosechada a propósito, es decir, la siembra de árboles de especies establecidas de acuerdo a sus propiedades, con el fin de taparlos para la producción de papel. El material restante proviene de fibra de madera de aserraderos, periódicos reciclados, algunas materias vegetales y tela reciclada (Gonzales Mora, 2003).

Los árboles de coníferas, tales como el abeto y el asbesto, solían ser preferidos para la fabricación de papel porque las fibras de celulosa en la pulpa de estas especies eran más largas, haciendo papel más fuerte. Estos árboles se llaman "madera blanda" por la industria del papel. Los árboles de hoja caduca (árboles frondosos como el álamo y el olmo) se llaman "madera dura" (Gonzales Mora, 2003).

Debido a la creciente demanda de papel, y las mejoras en la tecnología de procesamiento de pulpa, casi cualquier especie de árbol ahora se puede cosechar para el papel (Gonzales Mora, 2003).

#### **a) Fibras vegetales**

Las fibras vegetales son las fibras naturales provenientes de árboles, conocidas como madereras y otras plantas, conocidas como no madereras.

##### **i. Fibras de madera**

A nivel mundial, representa más del 92% de la producción mundial de pulpa (170 millones ton/año). Se dividen en latifoliadas y coníferas. Las latifoliadas son denominadas maderas duras y son de fibra corta (<1.5 mm), provienen de bosques tropicales como la gmelina, cetico, eucalipto, acacias y álamos. Las coníferas denominadas maderas blandas son de fibras largas (> 3 mm) y provienen de zonas tropicales como *Pinus caribaea* o templadas *Pinus radiata* y el *Pinus ellioti* (Gonzales Mora, 2003).

##### **ii. No madereras**

Las fibras de no madera (de frutos, hojas, haces vasculares y fibras liberianas) representan alrededor del 8 por ciento de la producción mundial de pulpa. En la mayoría de los casos, esta materia prima corresponde a un residuo agrícola como el bagazo de caña, tallos de cereales, linters de algodón, etc. que se obtienen al final de cada campaña, y que puede ser de una a dos veces al año. En otros casos se les cultiva anualmente, sólo para producción de pulpa (plantas anuales) o a partir de fuentes naturales, cosechada cada 2-3 años como el bambú o cada año como el bambú. Cabe resaltar que existen muchas materias primas que tienen un gran potencial de uso para la fabricación de pulpa, pero que a la fecha no se les da la importancia debida o no se utilizan a escala industrial (Gonzales Mora, 2003).

**Tabla 1.5: Clasificación de plantas no madereras (Gonzales Mora, 2003)**

Plantas no madereras	Grupo botánico	Características
<b>Fibras de tallos</b>		
Haces vasculares	Gramíneas	Fibras cortas Tejidos de haces fibrosos
<b>Fibras liberianas</b>	Docotiledóneas	Tejido floemático (de corteza)
<b>Fibras de frutos</b>	Malvaceas Bombacaceas	Fibras largas de alta resistencia
<b>Fibras de hojas</b>	Suculentas Palmeras	

**b) Fibras recuperadas**

Al fabricar pulpa se recurre, no solo a la incorporación de madera nueva, sino también al reciclado añadiendo a la pasta telas de lino y algodón y gran cantidad de papel viejo. El reciclado genera un 11% en masa de desechos contaminados con metales pesados que provienen tanto de las tintas usadas anteriormente como del caolín utilizado para absorberlas.

Se necesita en todo momento de fibra fresca para sostener el proceso de reciclaje, puesto que las fibras únicamente pueden reaprovecharse un máximo de siete veces. El reciclaje reiterado resulta en fibras cada vez más cortas y débiles, que finalmente han de ser desechadas dentro del proceso de recuperación. Estas fibras desgastadas podrán ser incineradas para la producción de energía (EPA, 2016). Finalmente, las fibras más usadas por la industria se destallan en las tablas 1.6 y 1.7.

**Tabla 1.6: Especies forestales usadas en la industria de la pulpa (Latifoliadas)  
(Gonzales Mora, 2003)**

LATIFOLIADAS	PAÍS O REGIÓN
aliso ( <i>Alnus</i> sp.)	EEUU, s. Europa
abedul ( <i>Betula</i> sp.)	Canadá, n. Europa
Álamo o chopo ( <i>Populus</i> spp.)	EEUU, Europa
<i>Eucalyptus globulus</i>	España, Portugal, Chile, Uruguay
<i>Eucalyptus regnans</i>	Australia
<i>Eucalyptus saligna</i>	Brasil, Argentina
<i>Eucalyptus grandis</i>	India
<i>Gmelina arborea</i>	Brasil

**Tabla 1.7: Especies forestales usadas en la industria de la pulpa (Coníferas)  
(Gonzales Mora, 2003)**

CONIFERAS	PAÍS O REGIÓN
Abeto ( <i>Abies</i> sp. y <i>Picea</i> sp.)	EEUU, Canadá, n. Europa
Alerce ( <i>Larix</i> sp.)	EEUU, Japón, Rusia
falso abeto ( <i>Tsuga</i> sp.)	EEUU, Canadá
thuja ( <i>Thuja</i> sp.)	EEUU, Canadá
<i>Pinus elliotti</i>	EEUU, Brasil
<i>Pinus patula</i>	EEUU, Sudáfrica
<i>Pinus radiata</i>	Chile, Nueva Zelandia, Sudáfrica
<i>Pinus strobus</i>	EEUU, Canadá
<i>Pinus pinaster</i>	España, Francia
<i>Pinus sylvestris</i>	Europa
<i>Pinus caribaea</i>	Centroamérica, Colombia, Venezuela

### **1.4.2 Proceso general de producción de papel**

El proceso de producción de papel consiste en diferentes etapas que según (Chiluiza et al., 2009) y (Qin et al., 2016) son las siguientes:

#### **a) Recepción y almacenamiento**

La caña guadua se recibe seca y sin ramas ni espinas grandes, con el fin de evitar algún tipo de accidente. Se verifica que el material cumpla con los criterios de diámetro y grosor de pared correspondientes a un culmo maduro, así como la coloración del mismo. Esto se realiza con el fin de utilizar materia prima con un adecuado grado de madurez y es almacenada en pacas (Chiluiza et al., 2009).

#### **b) Trituración**

Las varas de guadua se trituran de forma que el tamaño de los fragmentos sea de aproximadamente 2 cm<sup>2</sup>, con un espesor de 1 a 2 mm (Chiluiza et al., 2009).

#### **c) Tamizado**

Con el tamizado se pretende eliminar, polvo, arena o cualquier otro tipo de partículas, así como poder retornar chips de mayor tamaño al deseado.

#### **d) Humectación**

El proceso de humectación se realiza para ablandar los chips de bambú y permitir una penetración más eficiente del reactivo. Este se realiza por 24 horas a una relación sólido/líquido de 1:10 (Chiluiza et al., 2009).

#### **e) Escurrido**

Se escurre el agua de la humectación para obtener la pulpa humectada y el agua puede ser reutilizada en otros lotes (Chiluiza et al., 2009).

#### **f) Digestión**

En esta etapa la lignina es disuelta por reactivos químicos específicos, liberando las fibras celulósicas. El proceso de digestión se lleva a presión y temperatura controlada en la cual la materia prima se alimenta previamente preparada, se agrega el licor de cocción y se calienta por medio de vapor o cualquier otra fuente de calor, hasta alcanzar las condiciones de operación seleccionadas (Chiluiza et al., 2009).

#### **g) Lavado**

Este se realiza con gran frecuencia después de cada proceso con el objetivo de eliminar residuos de las soluciones utilizadas y se realiza hasta que el agua se ve clara y sin impurezas (Chiluiza et al., 2009).

#### **h) Blanqueo**

Esta etapa es de purificación, ya que la materia prima presenta alto contenido de celulosa. La intensidad o no del blanqueo depende de la pulpa procesada y del uso final del producto (Qin et al., 2016).

#### **i) Refinado o batido**

El batido se realiza para modificar las fibras de la pulpa de modo que se incorporen para formar un papel con las características deseadas. La batidora tradicional es un tanque acanalado de forma oval, cuya parte principal es un rodillo giratorio en el que se encuentran insertadas varias hojas metálicas romas, denominadas cuchillas. De acuerdo a la disposición de las cuchillas dentro de la batidora, la fibra será cortada, fibrilada (deshilachada), machacada e hidratada durante el batido (Chiluiza et al., 2009).

#### **j) Formación del papel**

El papel es una lámina delgada obtenida en base a fibras vegetales de celulosa, las cuales se unen mediante enlaces por puente de hidrógeno y forman una estructura

resistente y flexible (Chiluiza et al., 2009).

El formado de la hoja consiste en un proceso de filtración, que se realiza sobre una malla metálica, en mesas planas denominadas fourdrinier a nivel industrial o en máquinas de formadores de cilindros, donde se produce el entrecruzamiento de las fibras. Con cierta agitación, mientras se va drenando el contenido de agua de la pasta, va quedando sobre la malla un depósito laminar de fibras húmedas que constituyen la hoja de papel (Chiluiza et al., 2009).

#### **k) Prensado y secado**

En la etapa de prensado, la hoja de papel pasa por prensas que la estrujan y cuyo objetivo principal es disminuir la cantidad de agua del papel por compresión. Por último, se procede a un secado al sol que termina de eliminar el agua y se procede a un alisado final, lo que mejora la calidad final del papel y lo prepara para su uso (Chiluiza et al., 2009).

### **1.5 Industria de la pulpa y el papel en El Salvador**

El Salvador no produce pulpa celulósica, sin embargo, la industria del papel es una de las más fuertes en el país. En 2018, el total de exportaciones de papel y cartón, así como artículos de pulpa de papel fueron de \$322.7 millones. Las cantidades abrumadoras de estas exportaciones son a otros países de América Central e incluyen productos como: papel higiénico, envases de cartón, etiquetas, servilletas y manteles de papel, y cajas de cartón (ITA, 2019).

Las compañías líderes en la industria de la producción de papel y cartón incluyen: Kimberly-Clark de Centroamérica S.A de C.V. Sigma Q, Alas Doradas, S.A de C.V, Smurfit Kappa (Cajas y bolsas, S.A), Evergreen Packaging de El Salvador, S.A de C.V, Albacrome Sociedad Anónima de Capital Variable, Bemisal, S.A de C.V y R.R Donnelley de El Salvador, S.A de C.V. (ITA, 2019).

A continuación, se presenta una lista de las empresas dedicadas a la industria del papel, cartón y artes gráficas en El Salvador:

**Tabla 1.8: Empresas de la industria del papel, cartón y artes gráficas en El Salvador (ASI, 2018)**

<b>Empresa</b>	<b>Ciudad</b>	<b>Productos</b>
Cajas y Bolsas S.A.	San Salvador	Bolsas, envases, empaques y embalajes
Bemisal, S.A. de C.V.	San Salvador	Bolsas, envases, empaques y embalajes
Rua, S.A. de C.V.	San Salvador	Bolsas, envases, empaques y embalajes
Kimberly Clark de Centroamérica, S.A.	La Libertad	Fabricación de artículos de papel y cartón
Convertidora de Papel Salvadoreña, S.A. de C.V.	La Paz	Fabricación de productos diversos
Evergreen Packaging de El Salvador	La Libertad	Fabricación de productos diversos de papel y cartón
Alas Doradas, S.A. de C.V.	La Libertad	Papel y cartón
Cartonesa, S.A. de C.V.	La Libertad	Papel y cartón ondulado y envases
Artes Gráficas de El Salvador, S.A. de C.V.	San Salvador	Papel, cartón y artes gráficas
Sigma, S.A. de C.V.	San Salvador	Papel, cartón y artes gráficas

## CAPÍTULO II

### PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE PULPA CELULÓSICA PARA LA PRODUCCIÓN DE PAPEL

Existen diferentes técnicas para la extracción de pasta celulósica, lo cual se logra por medios químicos, mecánicos o mediante combinaciones de ambos procesos (Yacelda Perugachi, 2018). El objetivo del proceso de extracción es eliminar la mayor cantidad posible de lignina sin sacrificar la resistencia de la fibra, liberando así la fibra y eliminando las impurezas que causan la decoloración y la posible desintegración futura del papel (Bajpai, 2015).

**Tabla 2.1: Tipos de pasta según su proceso de obtención (Bermúdez et al., 2002)**

Proceso	Tipo de Pasta	Procedimiento	% R <sup>2</sup>
Mecánico	Mecánica	Desfibrado mediante la acción de dos discos que giran en sentido contrario	93-98
	Termodinámica	Procedimiento mecánico, con aplicación de calor para debilitar la unión entre fibras.	91-95
	Termoquímica	Procedimiento mecánico, con adición de agentes químicos y aplicación de calor	65-90
Semi-Químico	Sulfito neutro (NSSC)	Tratamiento químico (adición de sulfito y bicarbonato sódicos) previo al desfibrado mecánico	65-90
Químico	Kraft o al sulfato	Degradación de la lignina mediante una mezcla de sulfuro e hidróxidos sódicos	40-55
	Sulfito	Degradación de la lignina mediante mezclas de sulfito sódico con distintas bases	45-60
	Alcalina	Degradación de la lignina mediante la acción del hidróxido sódico	45-55

---

<sup>2</sup> Porcentaje de pasta seca sobre madera seca

## **2.1 Procesos mecánicos para extracción de pulpas celulósicas**

Los procesos mecánicos trituran la madera y liberan las fibras, en este procedimiento convierte la madera en pulpa, pero se conserva la lignina, lo que posteriormente le da un tinte amarronado o amarillento (Yacelda Perugachi, 2018).

La pasta mecánica puede dividirse en cuatro categorías que consisten en pulpa de madera triturada, pulpa mecánica refinada (RMP), pulpa termomecánica (TMP) y pulpa quimtermomecánica (CTMP) (Laftah y Abdul Rahman, 2016).

### **2.1.1 Madera triturada**

La pasta de madera triturada se utiliza normalmente cuando se desea fabricar papel prensa y de revista. Esta técnica se considera poco costosa y produce papeles de altas propiedades de absorción. El principio de esta técnica consiste en forzar las materias primas de madera contra una muela que gira rápidamente. El papel producido con este método puede ofrecer un gran volumen y una excelente opacidad, pero una resistencia mecánica relativamente baja. Por lo tanto, también puede utilizarse para producir cartones plegables y moldeados, pañuelos de papel y productos similares (Laftah y Abdul Rahman, 2016).

### **2.1.2 Pulpa mecánica refinada**

A diferencia de la madera triturada, el proceso RMP se desarrolló en la década de 1950 para mejorar la calidad del papel en la industria papelera. La pasta producida con esta técnica es mucho más resistente y se pueden utilizar diversos suministros de astillas de madera, residuos de aserradero y serrín. Sin embargo, las necesidades energéticas de la RMP son mayores y la pasta no tiene la opacidad de las fibras de madera trituradas (Laftah y Abdul Rahman, 2016).

### **2.1.3 Pulpa termomecánica**

En el proceso TMP, la madera se astilla y se introduce en grandes refinadoras calentadas por vapor donde las astillas se exprimen y se convierten en fibras entre dos discos de acero (Laftah y Abdul Rahman, 2016).

### **2.1.4 Pulpa quimitemomecánica**

La técnica CTMP aumenta las propiedades de resistencia de las pulpas producidas mediante TMP al pretratar suavemente las fibras con sulfito de sodio. En general, las pastas producidas mediante CTMP tienen una mayor fracción de fibras largas y una menor fracción de finos que la de las pastas TMP (Laftah y Abdul Rahman, 2016).

La mayor amenaza para el futuro de la pasta mecánica es su elevado consumo específico de energía. En este sentido, los procesos de TMP son los más afectados debido a su demanda de energía considerablemente mayor que los procesos de madera triturada. Además, el creciente uso de la pasta recuperada ejercerá presión sobre el crecimiento de los volúmenes de pasta mecánica (Bajpai, 2015).

## **2.2 Procesos semiquímicos para extracción de pulpas celulósicas**

El pulpado semiquímico utiliza una combinación de energía química y mecánica para extraer la pasta de papel. Las astillas de madera se ablandan parcialmente en un digestor con productos químicos, vapor y calor. Una vez ablandadas las astillas, los métodos mecánicos completan el proceso de fabricación de la pasta. La pulpa se lava después de la digestión para eliminar las sustancias químicas del licor de cocción y los compuestos orgánicos disueltos. Esta pasta virgen se mezcla con un 20-35% de pasta recuperada (por ejemplo, recortes de madera kraft de doble revestimiento) o fibra secundaria repulida (por ejemplo, viejos envases de cartón ondulado) para mejorar la maquinabilidad (Bajpai, 2015).

### **2.2.1 Sulfito neutro**

En las fábricas actuales, la parte química del proceso de fabricación de pasta semiquímica utiliza un proceso semiquímico sin azufre o de sulfito neutro (NSSC). El proceso sin azufre utiliza sólo carbonato de sodio o mezclas de carbonato de sodio e hidróxido de sodio para la cocción de las astillas de madera, mientras que el proceso NSSC utiliza un licor de cocción de sulfito a base de sodio. Las pastas semiquímicas, que pertenecen a la categoría de las pastas químicas, se obtienen principalmente a partir de maderas duras con rendimientos que oscilan entre el 65 y el 85% (la media es de aproximadamente el 75%) (Bajpai, 2015).

El proceso semiquímico más importante es el proceso NSSC, en el que las astillas se someten a una pulpa química parcial utilizando una solución de sulfito de sodio tamponada, y luego se tratan en refinerías de disco para completar la separación de la pasta. La sulfonación de la lignina, principalmente de la lámina media, provoca una disolución parcial, de modo que las fibras se debilitan para la posterior desfibración mecánica. La pasta NSSC se utiliza para productos no blanqueados en los que una buena resistencia y rigidez son especialmente importantes (Bajpai, 2015).

## **2.3 Procesos químicos para extracción de pulpas celulósicas**

La fabricación de pasta química implica la "cocción" de materias primas mediante soluciones químicas acuosas a una temperatura y presión elevada para extraer las fibras de la pasta (Bajpai, 2015).

### **2.3.1 Proceso kraft**

El proceso kraft produce una variedad de pulpas que se utilizan principalmente para envases, papeles y cartones de alta resistencia. El proceso Kraft domina la industria debido a sus ventajas en la recuperación química y la resistencia de la pasta.

Representa el 91% de la pulpa química y el 75% de toda la pulpa producida (Bajpai, 2015).

El proceso kraft convencional consiste en el agregado de licor de cocción (licor blanco) a las astillas según la relación licor-madera más adecuada. El licor blanco consiste en hidróxido de sodio (NaOH), sulfuro de sodio (Na<sub>2</sub>S) y puede incluir impurezas de carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) (Area y Valade, 1996).

El digestor se calienta hasta una temperatura de 160 – 180 °C durante 0.3 – 2 h dependiendo del grado de deslignificación requerido (Area y Valade, 1996). Una vez que las astillas se han "cocinado", el contenido del digestor se descarga bajo presión en un tanque de soplado, impacta en la entrada tangencial del tanque de soplado y las astillas se desintegran en fibras o "pulpa" (Bajpai, 2015).

La pulpa y el licor de cocción gastado (licor negro) se separan posteriormente en una serie de lavadoras de pasta negra (Bajpai, 2015). El licor negro es posteriormente evaporado hasta alcanzar 60% de sólidos (Area y Valade, 1996).

Generalmente se utilizan para el envasado de productos y se cocinan hasta alcanzar el nivel de calidad deseado. Se utilizan generalmente para productos de empaque y se cocinan para obtener un mayor rendimiento y retener una mayor cantidad de lignina original. Las pastas blanqueadas se utilizan para la producción de papel blanco (Bajpai, 2015).

### **2.3.2 Proceso del sulfito**

El licor de cocción en el proceso de pulpa de sulfito es una mezcla ácida de ácido sulfuroso y de iones de bisulfito. En la preparación de los licores de cocción de sulfito, el dióxido de azufre enfriado se absorbe en agua que contiene una de las cuatro bases químicas: magnesio, amoníaco, sodio o calcio. El proceso de despulpado con

sulfito utiliza la solución ácida en el licor de cocción para degradar los enlaces de lignina entre las fibras de madera (Bajpai, 2015).

Dentro de este proceso se encuentran el pulpado al sulfito ácido y el pulpado al bisulfito. El pulpado al sulfito ácido comúnmente inicia entre los 70 a 80°C y se calienta lentamente hasta los 120°C, teniendo como temperaturas máximas de 130 a 145°C con un tiempo de cocción de alrededor de 7 horas y pH de 1.2 a 1.5, mientras que el pulpado al bisulfito se lleva a cabo a temperaturas mayores de aproximadamente 170°C, durante 6 horas, en un rango de pH de 3 a 5 (Area y Valade, 1996).

Estas pastas tienen menos color que las pastas kraft y pueden blanquearse más fácilmente, pero no son tan resistentes lo que favorece la fabricación de papel. Además, la eficiencia y eficacia del proceso de sulfitado también depende del tipo de madera y de la ausencia de corteza, ya que es sensible a las características de las especies utilizadas como materia prima. El proceso al sulfito no suele tolerar las maderas blandas resinosas, las maderas duras que contienen taninos y cualquier producto que no sea de la misma calidad (Bajpai, 2015).

El proceso dominante de fabricación de pasta al sulfito en Europa es el sulfito de magnesio, con algunas fábricas que utilizan el sodio como base. Tanto la base de magnesio como la de sodio permiten la recuperación química. Los lignosulfonatos generados en el licor de cocción pueden utilizarse como materia prima para la producción de diferentes productos químicos (Bajpai, 2015).

### **2.3.3 Proceso de soda**

El hidróxido de sodio es de uso general en el proceso de cocción, es decir sirve para variedad de materias primas, cabe señalar que las condiciones son variables dependiendo de la especie. Entre sus principales ventajas se destacan la facilidad

en la preparación del licor ya que es tan solo necesario disolver el peso requerido de soda caústica (hidróxido de sodio, NaOH) en un volumen conocido de agua (Chiluiza Benítez y Hernández Lara, 2009). A escala de laboratorio se ha comprobado que las condiciones óptimas de digestión son: temperatura de 150°C, tiempo de digestión 60 min, concentración de hidróxido de sodio 5%, lo que dio un rendimiento de 54.20%. La relación sólido líquido en este proceso es de 1:10. (Chiluiza Benítez y Hernández Lara, 2009).

El proceso a la soda es el más antiguo y hoy solo se usa ocasionalmente para la producción de pastas, se emplea para materias primas que no son madera (Yacelda Perugachi, 2018).

Muchas de las primeras fábricas de soda se convirtieron al proceso kraft una vez que se descubrió. El proceso de soda sigue teniendo un uso limitado para los materiales fáciles de pulpar, como las pajas y algunas maderas duras, pero no es un proceso mayoritario. El AQ puede utilizarse como aditivo para reducir la degradación de los carbohidratos (Bajpai, 2018).

## **2.4 Tecnología emergente para extracción de pulpas celulósicas**

A pesar de estas ventajas, el proceso Kraft presenta algunos inconvenientes graves como el problema con la emisión de sustancias malolientes. Aunque el proceso Kraft produce un producto superior en calidad de la resistencia, la pasta Kraft requiere una secuencia de blanqueo muy eficaz para obtener los niveles de brillo deseados. Esto ha dado lugar a graves problemas de contaminación del agua debido a los efluentes coloreados y tóxicos, especialmente los fragmentos de lignina clorada procedentes del blanqueo. Por ello, muchos investigadores han buscado soluciones para minimizar los problemas existentes en la industria papelera mediante aplicando algunos métodos nuevos, uno de ellos es el denominado organosolv o cocción con disolventes (Laftah y Abdul Rahman, 2016).

### **2.4.1 Proceso organosolv**

Este proceso se utiliza para los retos que presenta el proceso Kraft que utiliza mezclas de agua y disolventes orgánicos como agentes deslignificantes, que pueden ser recuperados por sistemas de destilación y precipitación después del proceso de fabricación de pasta. El sistema de recuperación de disolventes es mucho más sencillo y barato que el sistema de recuperación Kraft, lo que reduce sustancialmente el coste de capital final. Como todo el proceso también está libre de azufre, entonces es posible recuperar el disolvente de los licores negros fácilmente utilizando sistema de biorrefinería (Laftah y Abdul Rahman, 2016).

## **CAPÍTULO III**

### **PROCESOS DE BLANQUEO DE PULPAS CELULÓSICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE PAPEL**

Los procesos de blanqueo se han desarrollado significativamente en los últimos dos siglos. Los primeros cien años fueron mayormente de aprendizaje y fue enfocado en el uso de hipoclorito. Los otros cien años iniciaron con la implementación de muchos más químicos a gran escala sin considerar su impacto ambiental, pero con el incremento del tamaño de las fábricas de pulpa celulósica la contaminación fue más evidente (Suess, 2010). A finales de los años 80 y principios de los 90, la preocupación y presión normativa como la de los consumidores por las dioxinas en los productos de papel y en las aguas residuales, condujo al desarrollo de técnicas que reducían el uso de cloro en la industria de la pasta de papel (Popp et. al., 2011).

#### **3.1 Agentes blanqueadores para pulpas celulósicas**

En el proceso del blanqueo se da la destrucción de los cromóforos, por lo que cualquier reacción química que disminuya la configuración de electrones en moléculas coloreadas es un potencial agente blanqueador. La configuración de una molécula puede ser modificada por reducción u oxidación. El uso de un químico para blanqueo depende mayormente de la selectividad, cualquier compuesto que inicie la oxidación de la celulosa o la hidrólisis (despolimerización) debe ser evitado, ya que puede destruir mucho del material a utilizar. Un agente blanqueador ideal no afecta a la fibra y solo destruye a los cromóforos. Esto descarta inmediatamente a los oxidantes fuerte y los de potencial reductor bajo. Además, con igual importancia se ha considerado el costo y el impacto ambiental de los químicos utilizados actualmente, lo cual deja un listado bastante limitado (Suess, 2010).

Algunos de los compuestos utilizados son:

- a) **Compuestos oxidantes:** oxígeno, dióxido de cloro, peróxido de hidrógeno y ozono.
- b) **Compuestos reductores:** ditionito de sodio (hidrosulfito)

Adicionalmente, a menor escala también se aplican en el blanqueo:

- a) **Compuestos oxidantes:** permanganato de potasio, sodio peroxodisulfato, ácido peracético, cloro e hipoclorito.
- b) **Compuestos reductores:** dióxido de azufre y ácido sulfúrico de formamidina.

El uso del cloro y el hipoclorito se ha disminuido. El químico blanqueador dominante es el dióxido de cloro, con un potencial de oxidación moderado a pH ácido, al igual que el peróxido de hidrógeno solo que para pH alcalino. Adicionalmente, las enzimas no entran en la categoría de “químicos blanqueadores”. Sin embargo, existe un nicho de aplicaciones en las que se usa enzimas como las xilanasas para facilitar el proceso de blanqueo (Suess, 2010).

### 3.2 Procesos ECF y TCF de blanqueo de pulpas celulósicas

El interés por la reducción de los haluros orgánicos adsorbibles (AOX, por sus siglas en inglés) y de los cloruros orgánicos totales (TOCl, por sus siglas en inglés) en los efluentes del blanqueo, ha promovido los procesos de blanqueo sin cloro elemental (ECF, por sus siglas en inglés) y totalmente libre de cloro (TCF, por sus siglas en inglés). En el año 2007, los procesos ECF formaron el 88.2% en la producción de pulpa blanqueada a nivel mundial, mientras que los procesos TCF fueron el 4.8%. Tanto el proceso ECF como el TCF probablemente producen menos pulpa por tonelada de fibras de madera que la pulpa blanqueada convencionalmente, porque el mayor número de etapas de blanqueo y lavado da lugar a una mayor pérdida de fibra. El proceso TCF, que tiene el ciclo de blanqueo más prolongado, tiene el rendimiento más bajo. La cantidad de pasta producida en las secuencias ECF es

más de 10 veces superior a la producida en las secuencias TCF. Las tendencias recientes sugieren que el crecimiento mundial de ECF está aumentando, mientras que la producción de TCF no ha aumentado sustancialmente desde 1995 (Bajpai, 2012).

### **3.3 Blanqueo con cloro de pulpas celulósicas**

Para fabricar una tonelada de pasta Kraft son necesarios entre 30 y 80 kg de cloro, dependiendo de la calidad de la pulpa utilizada. Este es el método de extracción que proporciona el mejor resultado con respecto a la calidad del papel porque disuelve toda la lignina sin que se ataque a la celulosa y el resultado es un papel blanco brillante que mantiene su aspecto durante décadas (López Sardi, 2007).

En la unidad de blanqueo se alternan fases de cloración con fases de lavados con soda cáustica (extracción) para retirar lignina. El cloro utilizado (en estado gaseoso) en un 90% se transforman en iones cloruro,  $\text{Cl}^-$ , (no tóxicos), 0.5 % queda retenido en la pasta, y el 9.5% restante se convierte en compuestos químicos órgano-clorados (AOX), entre los que se incluyen las dioxinas. Una pequeña proporción de estos AOX queda en el papel y la gran parte de los mismos queda en los residuos que la planta debería reciclar, tratar o retener antes de volcar los efluentes al medio ambiente (López Sardi, 2007).

### **3.4 Método ECF (parcialmente exento de cloro) de pulpas celulósicas**

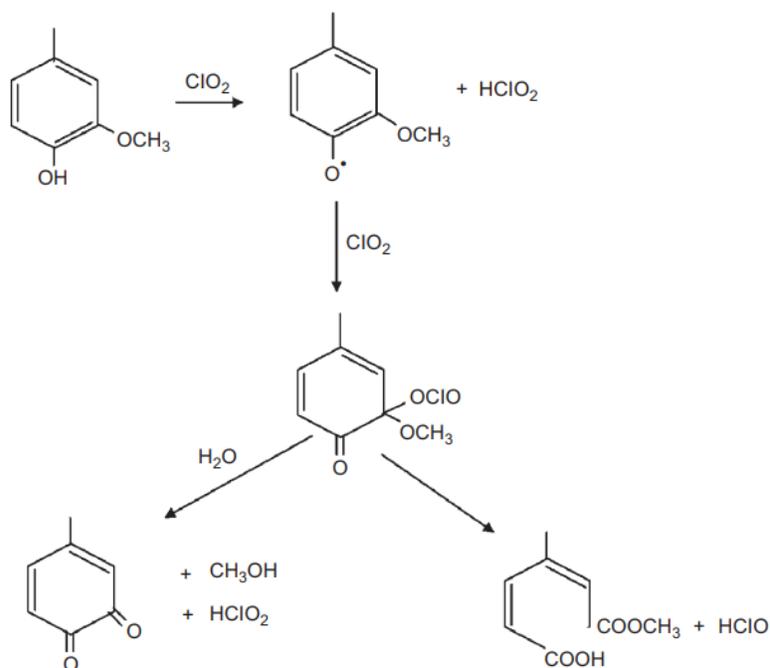
El blanqueo ECF es, por definición, un proceso sin cloro, ya que no se utiliza cloro elemental (molecular) en las secuencias de blanqueo. Aunque el término ECF no lo especifica, normalmente el dióxido de cloro es el principal agente blanqueador de estos procesos (Bajpai, 2012).

En 1921, E. Schmidt reportó que el dióxido de cloro es un agente blanqueador bastante selectivo que no reacciona con carbohidratos, pero fácilmente oxida a la lignina (Suess, 2010). El uso de dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) o de hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) permiten obtener una calidad de papel similar pero no modifican el problema de los AOX. Con este método no aparecen niveles detectables de dioxina ni en la pulpa ni en el efluente y se redujo la cantidad de AOX de 5 kg/tonelada de pulpa a 800 g/ tonelada de pulpa (López Sardi, 2007).

### **3.4.1 Dióxido de cloro como agente blanqueador de pulpas celulósicas**

A temperatura ambiente el dióxido de cloro es un gas inestable que explota si se comprime. No se puede transportar de forma segura y, por lo tanto, debe ser fabricado en el lugar donde se utiliza. En cuanto se forma, se disuelve en agua fría para formar una solución diluida, generalmente de 8 a 12 gramos por litro a 5 - 10 °C. Cuando la solución fría de dióxido de cloro se añade a la pulpa caliente, puede liberarse vapor de dióxido de cloro. Para evitarlo, las torres de blanqueo de dióxido de cloro están diseñadas para proporcionar una cabeza hidrostática significativa en el punto de adición del producto químico, que mantiene una presión suficiente para mantener el dióxido de cloro en solución hasta que reaccione con la pulpa (Bajpai, 2015).

Estudios sobre las reacciones del dióxido de cloro con los compuestos modelo de la lignina mostraron que reacciona con las estructuras fenólicas y olefínicas de la lignina. La predilección por las estructuras fenólicas es evidente al observar que la reacción del compuesto fenólico creosol fue siete veces más rápida que su análogo metilado, el 4-metilveratrole. El dióxido de cloro se reduce por la lignina a clorito y ácido hipocloroso. Los orgánicos clorados se forman por la reacción del ácido hipocloroso (en equilibrio con el  $\text{Cl}_2$  molecular) con la lignina (Bajpai, 2015).



**Figura 3.1. Reacción entre unidades fenólicas de lignina y dióxido de cloro (Sixta, 2006)**

Las variables importantes del proceso son la carga química (dióxido de cloro e hidróxido de sodio), el pH final, la temperatura, el tiempo, la consistencia de la pulpa, la concentración de oxidante residual y el arrastre de materia orgánica disuelta. La cantidad de dióxido de cloro aplicada depende de la etapa en la que se agrega y oscila entre 2kg/ton a 15 kg/ton. En la primera etapa, el pH final típico es de 3 a 4, en otras etapas este es menos crítico y suele ser mayor (Bajpai, 2015).

La temperatura en las etapas de dióxido de cloro es una de las principales variables de control y oscilará entre 50 y 90 °C. Son deseables tiempos de retención largos para lograr el máximo brillo. En algunos casos, el aumento de la capacidad de producción ha dado lugar a una disminución del tiempo disponible en las etapas de dióxido de cloro, con algunas etapas que tienen tan sólo 120 minutos o menos. El efluente que no se elimina de la pulpa contiene fragmentos orgánicos disueltos que provocan un mayor consumo de productos químicos y también afectan al brillo. El

blanqueo con dióxido de cloro se realiza normalmente a una consistencia media (9-15%), el nivel exacto depende de la consistencia de la descarga de la lavadora. Las lavadoras sobrecargadas pueden ofrecer consistencia del 9%, pero algunas lavadoras ofrecen un 16% o más. La consistencia en este rango tiene un efecto insignificante en la química de la reacción o en la eficacia del blanqueo. Se ha demostrado que el dióxido de cloro es muy eficiente con consistencias en el rango del 30-40%. Sin embargo, la operación en este rango requiere una inversión de capital muy alta y no se practica (Bajpai, 2015).

A mayor consistencia de la pulpa, la tendencia a la canalización se reduce. A menor consistencia de la pulpa, la necesidad de vapor para el calentamiento es mayor, y el tiempo de retención en una torre es más corto para una tasa de producción determinada. El límite superior de consistencia suele estar dictado por limitaciones de bombeo. La consistencia de la pasta disminuye del 12 al 10.7%, con la adición de 10 kg de dióxido de cloro por tonelada de pasta a 10 g/L (Bajpai, 2015).

### **3.5 Método TCF (totalmente exento de cloro) de pulpas celulósicas**

Este proceso incrementa el brillo de la pulpa, pero no separa lignina adicional, por lo que es necesario el uso de un 10% más de madera para la obtención de la misma cantidad de papel. La pasta obtenida está constituida por fibras más cortas lo cual limita las posibilidades de reciclado. No se detectan ni dioxinas ni AOX en el efluente, pero los niveles de dioxinas retenidos por el papel son más altos que en los métodos anteriores. Este método fue desarrollado por la empresa sueca SODRA, mayor productora europea de pasta de celulosa, y es el que aplica ENCE en su planta de Pontevedra (López Sardi, 2007).

Este método permite cerrar el ciclo de las aguas residuales de la planta, al no existir AOX en los vertidos (López Sardi, 2007).

Curiosamente se conocen estudios que indican que el papel procesado por el método TCF presentaría un nivel de dioxinas residuales en el propio papel que es mayor al nivel de dioxinas residuales en el papel Kraft obtenido por otras tecnologías. La pregunta es ¿de dónde proviene el cloro? (López Sardi, 2007)

En primer lugar, se pensó que el cloro provenía de los tratamientos potabilizadores del agua utilizada en la planta, pero esta posibilidad se descartó porque el nivel de dioxinas presentes en el papel tiene una cantidad de cloro superior a la que aparece en el agua potable al inicio del proceso. Esta pregunta seguiría sin respuesta y en investigación, pero actualmente se analiza la posibilidad de la formación del cloro durante el proceso a partir de la sal NaCl, presente ya sea en la materia prima (en la soda cáustica) o como componente contaminante habitual. Esta sal sufriría un proceso de oxidación a cloro por reacción química de tipo redox con el agua oxigenada en la etapa de blanqueo. (López Sardi, 2007)

### **3.5.1 Oxígeno como agente blanqueador de pulpas celulósicas**

El proceso de blanquear con oxígeno puede resultar diferente según su utilización, por ejemplo en el control de metales en el licor el proceso es más grande a diferencia de las plantas en base a oxígeno que es resultado que se alcanza fácilmente. La deslignificación trabaja con dos procesos: la cocción y la deslignificación con oxígeno, esta última tiene como objetivo reducir el costo de productos químicos para el blanqueo además de disminuir la contaminación ambiental y mejorar la calidad del producto, es uno de los procesos mejor vistos sobre todo porque durante años se buscó un proceso que no dañara al medio ambiente a comparación de otros métodos (Bajpai, 2012).

La deslignificación con oxígeno se puede realizar en una primera etapa como en una segunda etapa. La deslignificación puede variar en el rango de 40-70% dependiendo de la materia prima que se utilizan y si se emplean uno o dos reactores en

serie. Para blanquear no se elimina la lignina de la materia que se esté utilizando, ya que si se extrae se perdería el rendimiento de la materia que está siendo utilizada (Bajpai, 2012).

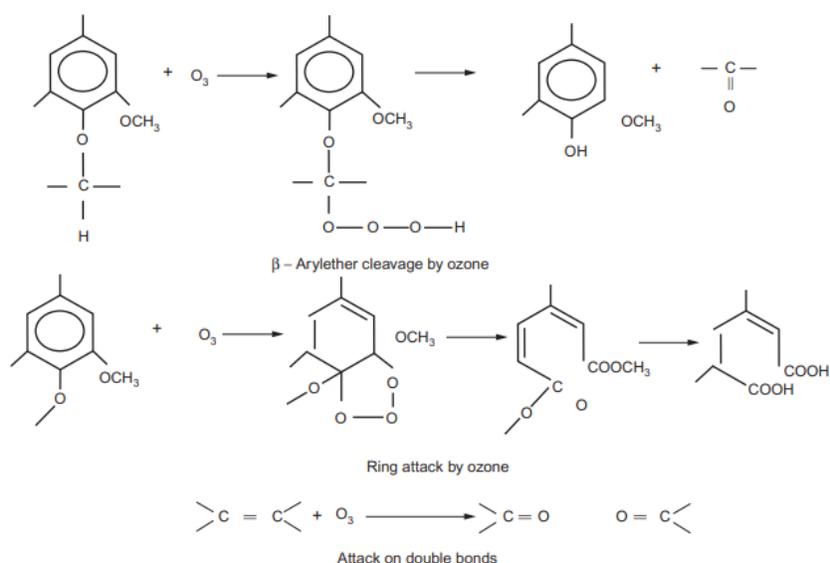
Al deslignificar con oxígeno se deben considerar ciertos aspectos entre ellos, que para tener un mejor rendimiento, y lograr la blanqueabilidad deseada es mejor utilizar el oxígeno y no procesos de cocción, si se va a utilizar este último proceso se debe hacer de la mano de la deslignificación con oxígeno, ya la deslignificación incluye los dos procesos, para todo proceso se debe siempre priorizar la deslignificación con oxígeno (Bajpai, 2012).

**Tabla 3.1. Condiciones para deslignificación con oxígeno (Bajpai, 2012)**

Etapa		Rango	
Grado de deslignificación	%	40-50	
Consistencia de la pulpa	%	10-15	
Presión	Mpa	0.4-0.6	
Temperatura	°C	85-95	
Tiempo	Min	60	

### 3.5.2 Ozono como agente blanqueador de pulpas celulósicas

El ozono es un fuerte electrófilo que reacciona con los grupos funcionales de la lignina residual.



**Figura 3.2 Reacciones entre el ozono y diversas unidades estructurales de la lignina (Sixta, 2006)**

Los dobles enlaces alifáticos conjugados y las estructuras de éteres de enol reaccionan con el ozono a través de intermediarios para formar grupos carbonilo y peróxidos. El ozono también puede reaccionar con las estructuras aromáticas de la lignina para formar ácidos. La mayoría de los grupos fenólicos son oxidados por el ozono. El ozono es mejor que el cloro y el dióxido de cloro para solubilizar la lignina mediante estas reacciones, y es mucho más reactivo con la lignina que con los carbohidratos, pero los subproductos inorgánicos intermedios formados por la descomposición directa, como los radicales hidroxilo y perhidroxilo, pueden ser muy reactivos con los carbohidratos (Sixta, 2006).

### **3.5.3 Peróxido de hidrógeno como agente blanqueador de pulpas celulósicas**

Se descompone para dar sólo agua y oxígeno, por lo que es ideal para aplicaciones en las que el efecto de los efluentes sobre el medio ambiente debe ser mínimo. En el ámbito del blanqueo químico de la pasta de papel, el peróxido de hidrógeno se utiliza sobre todo como refuerzo de las etapas de blanqueo existentes. Muchas fábricas utilizan peróxido de hidrógeno como refuerzo en la etapa de extracción después de la cloración, con o sin refuerzo adicional de oxígeno y en la segunda etapa de extracción (Bajpai, 2012).

El peróxido de hidrógeno en las extracciones alcalinas permite reducir el uso de compuestos clorados, además de aportar una serie de mejoras de calidad a la pasta y a los efluentes de la planta de blanqueo (Bajpai, 2012).

Las principales variables del proceso son la dosis de peróxido de hidrógeno, el tiempo, la temperatura, el pH y la consistencia de la pulpa (Bajpai, 2012).

Una etapa de blanqueo con peróxido, P, suele utilizarse para sustituir las etapas de blanqueo tradicionales en las fábricas que utilizan secuencias de blanqueo TCF o ECF. Las cargas típicas de peróxido de hidrógeno oscilan entre el 1.5 y el 4.5% en uno o varios puntos de aplicación. Para una sola etapa de aplicación, el límite práctico de la carga de peróxido es de aproximadamente 2.5% en la pulpa. En una secuencia de TCF bien ejecutada se consume aproximadamente el 80% de peróxido de hidrógeno. Las fábricas están instalando etapas de peróxido de hidrógeno de alta temperatura para mejorar la eficiencia de la etapa de peróxido de hidrógeno en lugar de invertir en grandes torres para conseguir un mayor tiempo de retención (Bajpai, 2012).

El blanqueo con peróxido se ve muy afectado por el pH, que debe ajustarse y tamponarse a 10.5 para obtener los mejores resultados. Si el pH es superior a 10.5, la competencia de las reacciones secundarias indeseables reduce la acción blanqueadora. El pH suele controlarse con hidróxido de sodio y silicato de sodio. La consistencia también tiene un impacto significativo en la determinación del nivel óptimo de alcalinidad. La relación molar óptima de hidróxido de sodio a peróxido de hidrógeno es de aproximadamente 1:1 en caso de blanqueo de consistencia media (9-12%), dependiendo de otros parámetros del proceso, mientras que en caso de alta consistencia (20-30%), los mejores resultados se obtienen a una relación molar de hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno de sólo 0.25 (Bajpai, 2012).

El rendimiento de la etapa de blanqueo con peróxido de hidrógeno es pobre cuando la temperatura es inferior al valor óptimo de unos 90 °C. Las condiciones del proceso en la etapa de extracción en la mayoría de las fábricas de celulosa suelen ser suficientes para utilizar eficazmente el peróxido de hidrógeno añadido (Bajpai, 2012).

### **3.6 Secuencias de blanqueo de pulpas celulósicas**

El blanqueo se lleva a cabo en un proceso de varias etapas que alterna la deslignificación y la extracción de material disuelto, puede añadirse una deslignificación adicional a base de oxígeno o peróxido de hidrógeno para reforzar la operación de extracción. Desde su introducción a principios de siglo, el blanqueo químico kraft se ha perfeccionado en una progresión gradual de reacciones químicas, evolucionando desde un tratamiento de hipoclorito (H) de una sola etapa a un proceso de varias etapas, que incluye cloro ( $\text{Cl}_2$ ), dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), peróxido de hidrógeno y ozono ( $\text{O}_3$ ). Las operaciones de blanqueo han evolucionado continuamente desde la secuencia convencional del CEHDED y ahora implican diferentes combinaciones con o sin productos químicos que contienen cloro (Bajpai, 2015).

**Tabla 3.2. Simbología de químicos en el blanqueo (Bajpai, 2015)**

Símbolo	Químico	Símbolo	Químico
<b>C</b>	Cloro	<b>Z</b>	Ozono
<b>D</b>	Dióxido de cloro	<b>E</b>	Hidróxido de sodio
<b>H</b>	Hipoclorito	<b>X</b>	Enzimas
<b>O</b>	Oxígeno	<b>Q</b>	Agentes quelantes
<b>P</b>	Peróxido de hidrógeno	<b>A</b>	Ácido

Anteriormente, se creía que no se podía conseguir un brillo ISO de 90 GU sin el uso de cloro y productos químicos que contienen cloro como agentes blanqueadores. La aplicación de la cocción modificada y la deslignificación basada en el oxígeno repercutió en todo el proceso al reducir el número kappa de la pulpa antes del blanqueo, reduciendo así la cantidad de productos químicos necesarios para el blanqueo (Bajpai, 2015).

**Tabla 3.3. Ventajas y desventajas de químicos en el blanqueo (Bajpai, 2015)**

Símbolo	Función	Ventajas	Desventajas
<b>C</b>	Oxidar y clorar la lignina.	Eficaz, económico.	Puede causar la pérdida de fuerza de la pulpa
<b>O</b>	Oxidar y solubilizar la lignina.	Bajo coste químico, proporciona un efluente libre de cloruro para su recuperación	La gran cantidad requerida de equipo costoso, puede causar la pérdida de fuerza de la pulpa.
			Continúa...

**Tabla 3.3. Ventajas y desventajas de químicos en el blanqueo (Bajpai, 2015) (Continuación)**

Símbolo	Función	Ventajas	Desventajas
<b>H</b>	Oxidar, abrillantar y solubilizar la lignina.	Fácil de hacer y usar.	Puede causar la pérdida de fuerza de la pulpa si se utiliza incorrectamente, es caro
<b>D</b>	Oxidar, abrillantar y solubilizar la lignina	Consigue un alto brillo sin degradación de la pulpa, buen blanqueo de las partículas.	Caro, debe hacerse in situ.
<b>P</b>	Oxidar y abrillantar la lignina	Fácil de usar, alto rendimiento y bajo coste de capital.	Caro, pobre blanqueo de partículas.
<b>Z</b>	Oxidar, abrillantar y solubilizar la lignina.	Eficaz, proporciona un efluente sin cloro para su recuperación.	Caro, pobre blanqueo de partículas.
<b>E</b>	Hidrolizar y solubilizar la lignina.	Eficaz y económico.	Oscurece la pulpa.

La aplicación única de productos químicos tiene un efecto limitado en la mejora del brillo o en la deslignificación. Por otro lado, la aplicación de productos químicos de blanqueo en varias etapas puede proporcionar beneficios mucho mayores. En las secuencias de blanqueo de una pasta química cada etapa tiene una función específica. La primera parte de la secuencia elimina la mayor parte de la lignina residual de la pasta. En las últimas etapas de la secuencia, las llamadas etapas de blanqueo, se eliminan los cromóforos de la pasta y el brillo aumenta hasta un nivel elevado (Bajpai, 2015).

Tabla 3.4. Secuencias de blanqueo para reducir o eliminar el cloro (Bajpai, 2015)

Aplicación	Secuencia
<b>Cloro reducido</b>	(C)-P-H
	(C)-P-D-H
	(C)-P-H-D-H
<b>Sustitución del peróxido</b>	P-D-P
	P-D-H
	P-H-H
	P-H-D
	D-P-D
	P-H-D-H
	P-D-P-D
<b>Blanqueo con oxígeno</b>	O-P
	O-D
	O-H
	O-P-D
	O-D-P
	O-C-P
	O-H-P
	O-C-P-D
	O-D-P-D
<b>Blanqueo con ozono</b>	Z-E-P
	Z-E-Z
	Z-E-Z-P
<b>Ácido peracético</b>	P-A-P
	A-E-A-E-A
<b>Otros</b>	O-Q-P
	O-Q-P-P
	O-Q-P-Z-P

Aunque en la industria se usen varias etapas, es posible realizar el blanqueo en una etapa especialmente cuando la pulpa proviene del proceso de la soda (Mamaye et al., 2020).

## **CAPÍTULO IV**

### **METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN PARA EL PRE-DISEÑO DEL PROCESO SOSTENIBLE DE EXTRACCIÓN DE PULPA CELULÓSICA A PARTIR DE BAMBÚ**

La investigación será bibliográfica no experimental, sin embargo, es cuantitativa ya que se recopilaban datos para realizar el pre-diseño del proceso.

#### **4.1.1 Metodología de la revisión bibliográfica del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú**

La bibliografía debe ser lo más reciente posible, confiable y compatible con la materia prima establecida.

##### **a) Recopilación de la información**

Revisión, selección y organización del material bibliográfico de fuentes primarias, secundarias y terciarias vía electrónica como:

- i. Proyectos de investigación de grado académico de la biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura (FIA) de la Universidad de El Salvador (UES) y el del repositorio institucional.
- ii. Trabajos de investigación de otros países de la región encontrados en repositorios institucionales, google scholar, research gate, revistas científicas, entre otros.
- iii. Libros electrónicos.
- iv. Consultas directas a profesionales en el cultivo y manejo del bambú, profesionales en la producción de papel y a artistas como consumidores finales de papel artístico para conocer sus preferencias.
- v. Entre otros.

### **b) Revisión de la información**

Revisión, selección y organización del material bibliográfico. Se tomó en cuenta la información y los parámetros que generen el mayor rendimiento para el pre-diseño del proceso según la teoría consultada.

## **4.2 Metodología para la selección del proceso de blanqueo de la pulpa de bambú**

Dado que la investigación además de pre-diseñar un proceso también se tiene como objetivo tener un proceso de blanqueo TCF, este fue seleccionado primero con la metodología Pugh y a partir del resultado se decidió el proceso de extracción más adecuado.

### **4.2.1 Metodología Pugh para la selección del proceso de blanqueo de la pulpa de bambú**

La metodología Pugh se utiliza para evaluar de mejor manera las opciones dentro de un proceso de diseño. Este método consiste en categorizar y cuantificar los criterios de diseño, material, proceso, entre otros aspectos a evaluar basándose en la importancia del mismo, lo que permite obtener una selección adecuada. Esta metodología se describe en cuatro pasos aplicados sobre el criterio que considere el diseñador (Martínez et al., 2015).

Los pasos son los siguientes:

- a) Se asigna un valor puntual a cada criterio considerando la importancia que tenga sobre los demás parámetros. La escala seleccionada está comprendida entre dos valores 1 y 10 de menos a más importante.
- b) Las alternativas se evalúan con respecto a cada uno de los criterios, asignando mayor cantidad de valores positivos (+), negativos (-) hasta un

máximo de 3, a aquello que presenten características favorables, no aceptables. También aparece el neutro (0).

- c) Luego se realiza la sumatoria de los valores positivos, negativos y neutros que fueron asignados a cada alternativa. Previamente multiplicados por el factor de importancia del criterio.
- d) Una vez realizada la sumatoria, se selecciona la alternativa que presente el mayor resultado positivo.

### **4.3 Metodología del pre-diseño del proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú**

En el pre-diseño del proceso hay distintas variables a tomar en cuenta ya que se presente que sea sostenible, pero también es un proceso artesanal lo cual limita las opciones en cuanto los métodos de extracción, blanqueo y los equipos. Sin embargo, siempre se parte principalmente del balance de materia para el diseño de procesos, por lo que además de considerar los criterios de la ingeniería verde se procederá a hacer los cálculos necesarios.

#### **4.3.1 Definición de los criterios y especificaciones a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú**

Se tomó en cuenta los criterios de ingeniería verde de la sección 1.1.5, por lo tanto, se procurará cumplir con los mismos. También, se consideró las especificaciones del producto terminado, es decir las especificaciones de las hojas de papel para uso artístico.

### 4.3.2 Diagrama global a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú

En un diagrama global se representa a grandes rasgos las entradas y salidas del proceso a diseñar, para tener claridad de lo que se espera en el proceso.

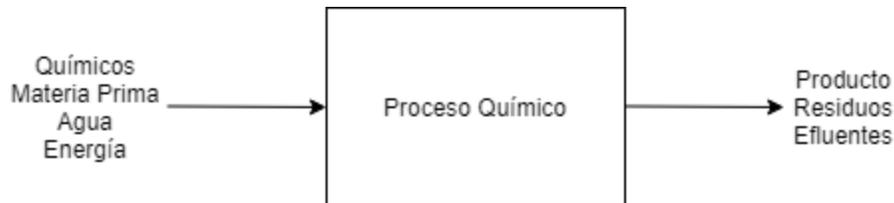


Figura 4.1. Ejemplo de diagrama global de un proceso

### 4.3.3 Diagrama de bloques a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú

El diagrama de bloques de cada etapa del proceso es el principal apoyo para la realización de balance de materia, por lo que es de suma importancia que este se realice lo más específico posible. En este paso se agregó también los puntos de control de calidad que se pueden tener.

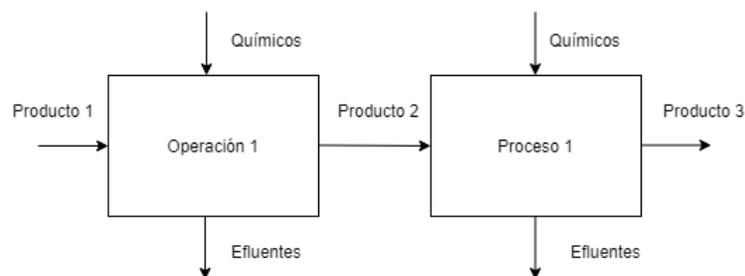


Figura 4.2. Ejemplo de diagrama de bloques de un proceso

#### 4.3.4 Diagrama de flujo a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú

El diagrama de flujo es la representación esquemática del proceso donde podemos simbolizar los equipos necesarios para la operación, así como los parámetros necesarios para su óptimo funcionamiento.

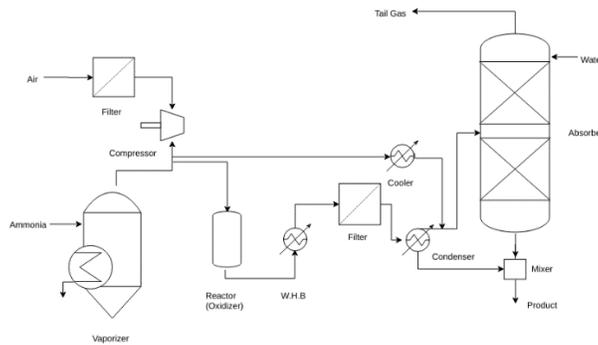


Figura 4.3. Ejemplo de diagrama de flujo de producción de químicos

#### 4.3.5 Balance de materia por operación unitaria a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú

En esta etapa se calcularon las cantidades de masa que entran y salen de cada operación tomando en cuenta los rendimientos de cada etapa definidos como resultados en la sección 5.3.

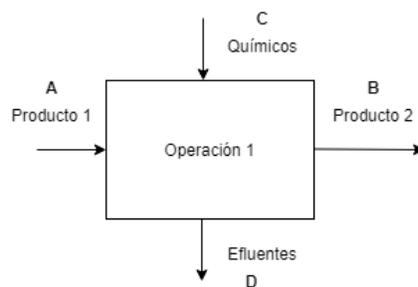


Figura 4.4. Balance de materia para una operación unitaria

Para el diagrama de la figura 4.4 el balance de materia sería:

$$A + C = B + D \text{ (Ecuación 4.1)}$$

#### **4.3.6 Selección y dimensionamiento de equipos a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú**

Para el dimensionamiento de equipos se toma en cuenta los resultados del balance de materia y para la selección de los mismos se identificaron criterios sirvieron para evaluar la idoneidad de una máquina o equipo para utilizarse en el proceso de extracción de pulpa celulósica y el blanqueo. El siguiente listado toma en cuenta las especificaciones técnicas del equipo y la naturaleza de su funcionamiento, las cuales serán investigadas y evaluadas con el fin de asegurar los objetivos de este estudio.

- a) Actividad a realizar
- b) Capacidad de producción
- c) Parámetros de control
- d) Consumo de energía
- e) Generación de residuos

#### **4.4 Metodología de control de calidad a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú**

Las metodologías para análisis de control de calidad, ya están establecidos en las normas TAPPI y se ha estipulado que se realicen en los puntos señalados en el diagrama por etapas. En el presente trabajo se establecieron análisis para el control de calidad de la materia prima y de la pulpa celulósica.

Control de calidad para materia prima (*Guadua angustifolia*):

- a) Pruebas de humedad, utilizando la norma TAPPI T 1 m-58

- b) Cantidad de cenizas, utilizando la norma TAPPI T 15 os-58
- c) Cantidad de celulosa, utilizando el método modificado de Kurschner y Hoffer
- d) Cantidad de lignina, utilizando la norma TAPPI T 222 os-74.

Control de calidad para la pulpa celulósica:

- a) Cantidad de alfa celulosa presente en la pulpa celulósica de bambú según lo indica el método TAPPI T203
- b) Cantidad de lignina, utilizando el método del Número Kappa, según lo indica el método TAPPI T236;
- c) Humedad de equilibrio en pulpas según la norma TAPPI T 550
- d) Análisis de licor residual según la norma TAPPI T 625.

#### **4.5 Metodología de evaluación de impactos ambientales a aplicar al proceso sostenible de la extracción de pulpa celulósica de bambú**

Se definió que la metodología a seguir para la evaluación de los impactos ambientales sería la metodología de criterios relevantes. En esta metodología la calificación de los impactos ambientales se realiza por medio de la evaluación de criterios considerados los más significativos (FAO, 1995).

- a) Tipo de acción** que genera el cambio.
- b) Carácter del impacto.** Se establece si el cambio en relación al estado previo de cada acción del proceso es positivo o negativo.
- c) Intensidad.** Se refiere al vigor con que se manifiesta el cambio por las acciones del proceso. El valor numérico de la intensidad se relaciona con el índice de calidad ambiental del indicador elegido, variando entre 0 y 10.

d) **Extensión.** Es la superficie afectada por las acciones del proceso de cosecha tanto directa como indirectamente o el alcance global sobre el componente ambiental. La escala de valoración es la siguiente:

Tabla 4.1. Valoración del criterio de extensión (FAO, 1995)

Extensión	Valoración
Generalizado	10
Local	5
Muy local	2

e) **Duración** del cambio. Establece el período de tiempo durante el cual las acciones propuestas involucran cambios ambientales. Se utilizó la siguiente pauta:

Tabla 4.2. Valoración del criterio de duración (FAO, 1995)

Duración (Años)	Plazo	Valoración
>10	Largo	10
5-10	Mediano	5
1-5	Corto	2

f) **Magnitud.** Es un indicador que sintetiza la intensidad, duración e influencia espacial. Es un criterio integrado, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$M_i = \Sigma[(I_i * W_i) + (E_i * W_E) + (D_i * W_D)] \text{ (Ecuación 4.2)}$$

Donde:

I = intensidad  $W_I$  = peso del criterio intensidad

E = extensión  $W_E$  = peso del criterio extensión

D = duración  $W_D$  = peso del criterio duración

$M_i$  = Índice de Magnitud del efecto i

$$W_I + W_E + W_D = 1$$

**g) Reversibilidad.** Capacidad del sistema de retornar a una situación de equilibrio similar o equivalente a la inicial:

**Tabla 4.3. Valoración del criterio de reversibilidad (FAO, 1995)**

Probabilidad	Rango (%)	Valoración
<b>Alta</b>	>50	10
<b>Media</b>	10-50	5
<b>Bajo</b>	1-10	2

**El índice integral de impacto ambiental VIA.** El desarrollo del índice de impacto se logra a través de un proceso de amalgamiento, mediante una expresión matemática que integra los criterios anteriormente explicitados. Su formulación es la siguiente:

$$VIA_i = \Pi [R_i^{wr} * RG_i^{wrg} * M_i^{wm}] \text{ (Ecuación 4.3)}$$

Donde:

R = reversibilidad      wr = peso del criterio reversibilidad

RG = riesgo              wrg = peso del criterio riesgo

M = magnitud            wm = peso del criterio magnitud

VIA = Índice de impacto para el componente o variable i.

Además,  $wr + wrg + wm = 1$

Los pesos relativos asignados a cada uno de los criterios corresponden a los siguientes:

$W_{intensidad} = 0.40$	$W_{magnitud} = 0.61$
$W_{extensión} = 0.40$	$W_{reversibilidad} = 0.22$
$W_{duración} = 0.20$	$W_{riesgo} = 0.17$

**Significado.** Se refiere a la importancia relativa o al sistema de referencia utilizado para evaluar el impacto. Consiste en clasificar el Índice o VIA obtenido, según las siguientes categorías:

**Tabla 4.4. Significado del valor VIA (FAO, 1995)**

<b>Indice</b>	<b>Nivel o significado</b>
<b>&gt; 8.0</b>	MUY ALTA
<b>6.0 – 8.0</b>	ALTA
<b>4.0 – 6.0</b>	MEDIA
<b>2.0 – 4.0</b>	BAJA
<b>&lt; 2.0</b>	MUY BAJA

## **CAPÍTULO V**

### **ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

#### **5.1 Revisión bibliográfica del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú**

Luego de una extensa investigación se obtuvo información de autores reconocidos en el área específicamente en bambú como lo es Londoño y en procesos de producción de papel en general como lo es Bajpai. El pre-diseño principalmente se hizo con base en los rendimientos del proceso de la investigación realizada por Chiluita et al., 2009 y Qin et al., 2016, debido al nivel de especificidad de la investigación no hay más fuentes detallando el balance de materia del proceso.

#### **5.2 Selección del proceso de blanqueo de la pulpa de bambú**

En este apartado se presentan y analizan los resultados de la selección del proceso de blanqueo de pulpa celulósica de bambú, mediante la comparación de los diferentes métodos TCF.

Los procesos evaluados son los siguientes:

- a) Blanqueo con peróxido de hidrógeno
- b) Blanqueo con oxígeno
- c) Blanqueo con ozono

Los criterios sobre los cuales se evaluaron los procesos de blanqueo de pulpa celulósica son:

- a) Inversión inicial.
- b) Costo del proceso y mantenimiento.
- c) Pretratamiento de la materia prima.
- d) Facilidad de aplicación a nivel artesanal

- e) Compatibilidad con el medio ambiente.
- f) Riesgos para la seguridad y salud ocupacional.
- g) Cantidad de etapas
- h) Complejidad de la secuencia.

Con base en la información recopilada en el capítulo II se tiene el resultado de la tabla 5.1.

**Tabla 5.1. Selección del proceso de blanqueo de la pulpa de bambú**

Criterio	Valor	Peróxido de hidrógeno	Oxígeno	Ozono
Inversión inicial	3	+	-	-
Costo del proceso y mantenimiento	2	-	0	-
Facilidad de aplicación a nivel artesanal	5	+	+	0
Compatibilidad con el medio ambiente	5	+	+	+
Riesgos para la seguridad y salud ocupacional	5	+	-	0
Cantidad de etapas	4	-	+	-
Complejidad de la secuencia	5	+	+	-
Total positivos		23	19	5
Total neutros		0	0	0
Total negativos		-6	-8	-14
Total de ponderación		17	11	-9

Por lo tanto, se selecciona el proceso de blanqueo con peróxido de hidrógeno ya que posee más valores positivos.

### 5.3 Selección del proceso de extracción de la pulpa de bambú

En este caso no se aplicó la metodología de selección de procesos debido a que solo existe una referencia de un proceso de producción con la misma especie de bambú (*Guadua angustifolia*) como para retomar los datos del rendimiento de las etapas. Por lo tanto, el proceso seleccionado es el proceso de la soda el cual es compatible para su realización a nivel artesanal y también es compatible con el blanqueo de peróxido de hidrógeno en una sola etapa.

### 5.4 Pre-diseño del proceso de extracción de pulpa celulósica para papel de bambú

En este apartado se especifican los parámetros y el balance de materia del proceso general que sigue las etapas descritas en el apartado 1.4.2. tomando en cuenta que la digestión del bambú será por el método de la soda y el blanqueo de la pulpa de bambú será con peróxido de hidrógeno.

#### 5.4.1 Definición de los criterios y especificaciones del papel artístico a partir de bambú

El papel producido por los procesos seleccionados tiende a ser un papel artístico de gramaje medio, esto se les consultó a artistas acerca de su preferencia los cuales expresaron que su decisión se basa en tamaño del papel y gramaje según su uso.

Tabla 5.2. Especificaciones del papel artístico a partir de bambú

Característica	Especificación
Tamaño	¼ de pliego (32 x 47 cm)
Gramaje	160 gsm

### 5.4.2 Diagrama global del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú

De forma general el proceso de producción de papel de bambú se puede definir a continuación:

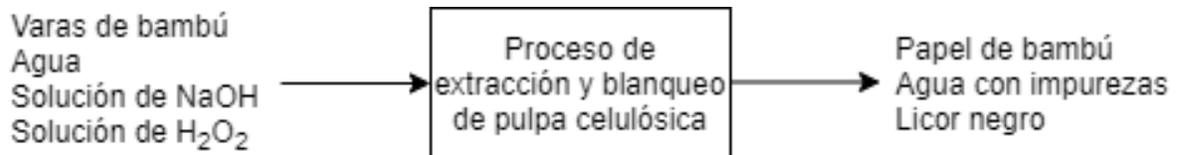


Figura 5.1. Diagrama global del proceso de producción de papel

Las varas de bambú son la principal materia prima para el proceso de producción, esta deberá ser triturada y humectada con agua. En el proceso de digestión se agregará la solución de NaOH también conocida como licor blanco y de este proceso resulta el licor negro. Se lava la pulpa con agua y se obtiene más licor negro a menor concentración. En el proceso de blanqueo se utiliza la solución de peróxido de hidrógeno y luego de este proceso se vuelve a lavar la pulpa. Los demás procesos tienen consumo de energía, pero en esta etapa no se está adicionando nada más que el agua.

### 5.4.3 Diagrama de bloques del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú

En este diagrama se presenta de forma desglosada el diagrama global con sus dos procesos principales como lo son la digestión y el blanqueo junto con varias operaciones de lavado para retirar el químico y la lignina, entre otras operaciones.

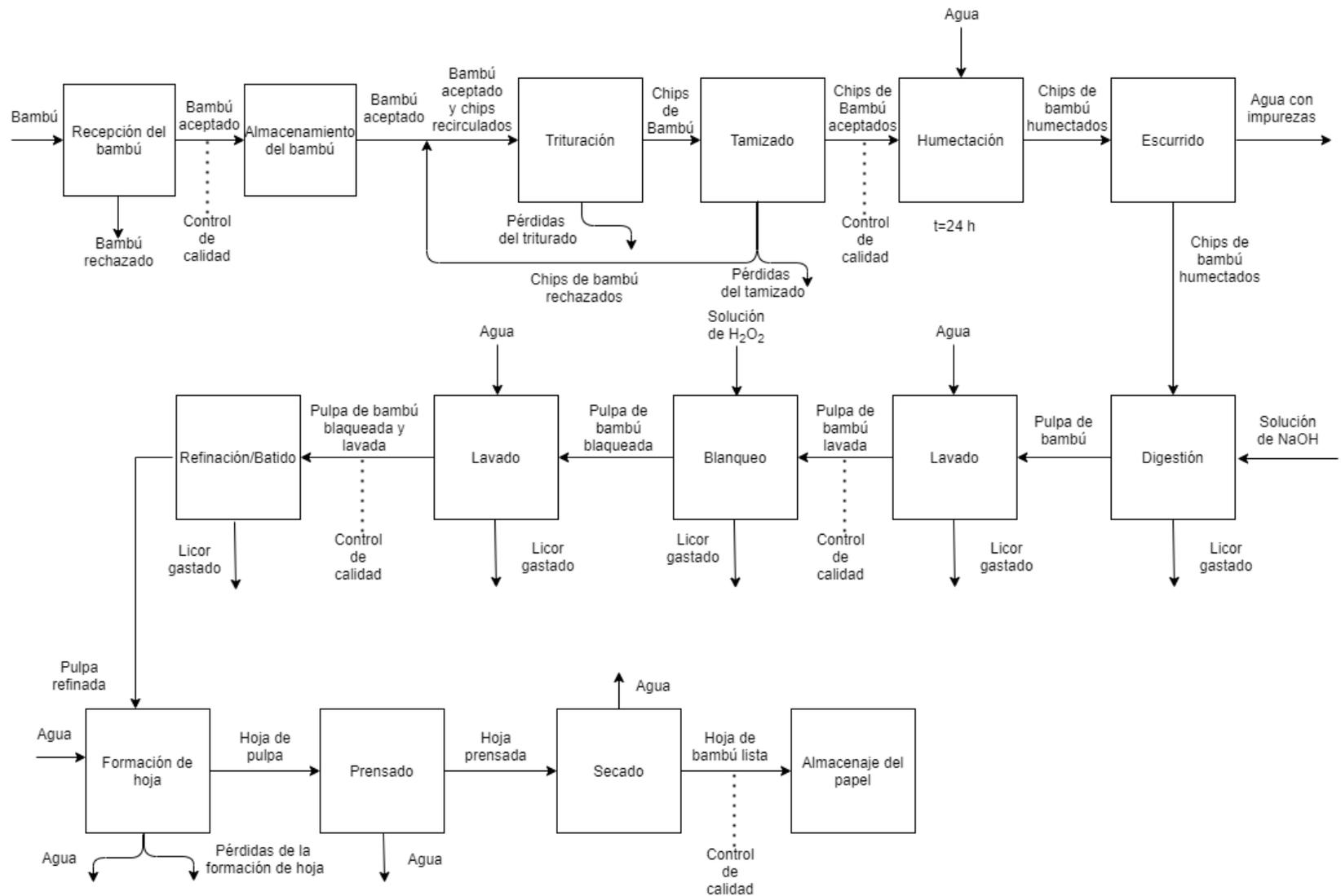


Figura 5.2. Diagrama de bloques del proceso de producción de papel de bambú

#### 5.4.4 Parámetros del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú

En la tabla 5.3, se presenta el consolidado de parámetros elegidos de diversas fuentes para el pre-diseño del proceso.

Tabla 5.3. Parámetros de operación del proceso de producción de papel

Proceso	Parámetros y condiciones	Referencia
<b>Trituración</b>	Tamaño de los chips 2 x 2 cm	Chiluiza et al., 2009
	Pérdidas del 1%	Rolón et al., 2016
<b>Tamizado</b>	Pérdidas del 1% con recirculado del 9%	Rolón et al., 2016
<b>Humectación</b>	Relación sólido/líquido de agua 1:10 y t = 24 h	Chiluiza et al., 2009
<b>Escurrido</b>	Escurre el 97% de agua con 1% de impurezas	Chiluiza et al., 2009
<b>Digestión</b>	T=150 °C, t = 1 h y R = 54.20%. Solución de NaOH al 5%, 1:10. Sale 80% licor negro	Chiluiza et al., 2009
<b>Lavado 1</b>	Se agregan 4L de agua/kg de pulpa. Sale pulpa a consistencia del 10% con pérdidas del 1% en el licor gastado.	Chiluiza et al., 2009
<b>Blanqueo</b>	Se agrega solución de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> al 6% relación sólido/líquido de 1:10. Rendimiento de 86.8% a T=115 °C y t=60 min. Consistencia: 10%	Qin et al., 2016
<b>Lavado 2</b>	Se agregan 4L de agua/kg. Sale pulpa a consistencia del 25% con pérdidas del 1% en el licor gastado.	Chiluiza et al., 2009
<b>Batido</b>	Se tienen pérdidas del 3%	Chiluiza et al., 2009
<b>Formación de hojas</b>	Se agregan 14L de agua/kg. Se tienen pérdidas del 2%	Chiluiza et al., 2009
<b>Prensado</b>	Se obtiene una consistencia de pulpa de entre 33% - 55%	Universidad de British Columbia, 2013
<b>Secado</b>	t = 48 h al final del secado el 94% son sólidos	Chiluiza et al., 2009

### 5.4.5 Diagrama de bloques del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú

Dados los parámetros del proceso se realizó el diagrama de flujo del proceso.

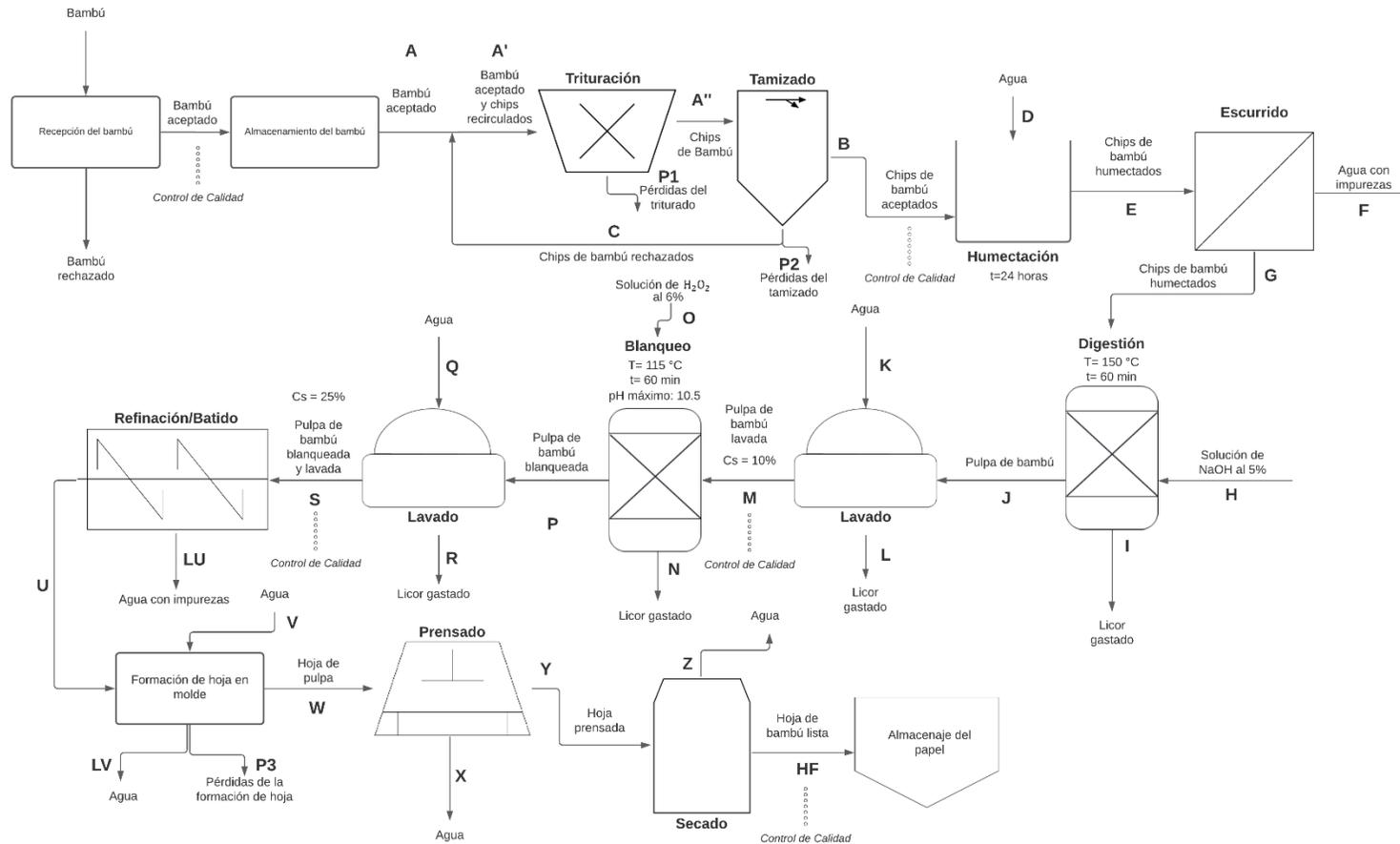


Figura 5.3. Diagrama de flujo del proceso de producción de papel

#### 5.4.6 Balances de masa de cada operación unitaria del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú

Este proceso en un inicio pretende cubrir solamente la demanda de papel artístico de dos academias de dibujo. El balance se realizó para la producción semanal de un lote de 176 hojas de papel artesanal de 160 gsm equivalente a 4,235.26 g, lo que implica el procesamiento de aproximadamente 10 kg de caña de guadua, véase el cálculo de la demanda en anexo 4.

##### a) Trituración

Partiendo del bambú aceptado se tiene el proceso de trituración y tamizado de aproximadamente 2 cm x 2 cm. Iniciando con 10 kg de bambú aceptado por lote y a este se le suma la recirculación del tamizado.

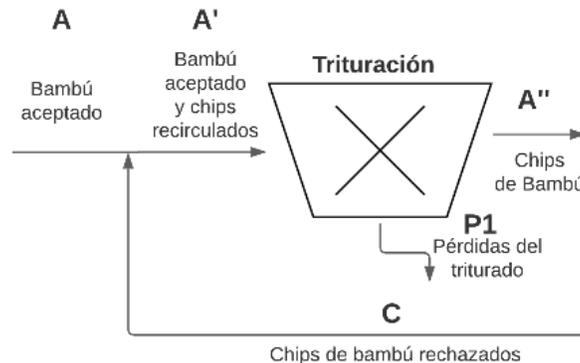


Figura 5.4. Entradas y salidas en el proceso de trituración de bambú

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.4 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$A' = A + C \text{ (Ecuación 5.1)}$$

$$C = 0.09A'' \text{ (Ecuación 5.2)}$$

$$P_1 = 0.01A' \text{ (Ecuación 5.3)}$$

$$A'' = 0.99A' \text{ (Ecuación 5.4)}$$

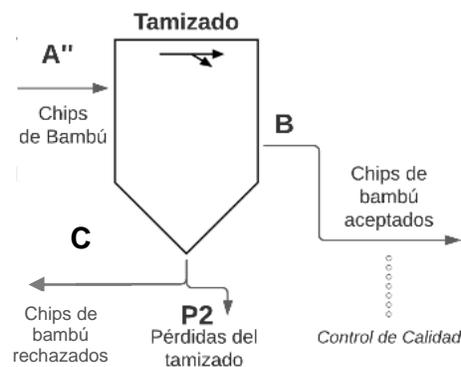
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.4, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.4. Entradas y salidas de la trituración del bambú**

Entradas	Salidas
$A = 10 \text{ Kg de astillas secas}$	$A'' = 10.8683 \text{ Kg de astillas trituradas}$
$C = 0.9781 \text{ Kg de astillas recirculadas}$	$P_1 = 0.1098 \text{ Kg de astillas perdidos}$
$A' = 10.9781 \text{ Kg de astillas secas}$	

### b) Tamizado

Del tamizado se obtiene el 90% de los chips que ingresan, el 9% es recirculado y el 1% es pérdida.



**Figura 5.5. Entradas y salidas en el proceso de tamizado de bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.5 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$B = 0.90 * A'' \text{ (Ecuación 5.5)}$$

$$P_2 = 0.01 * A'' \text{ (Ecuación 5.6)}$$

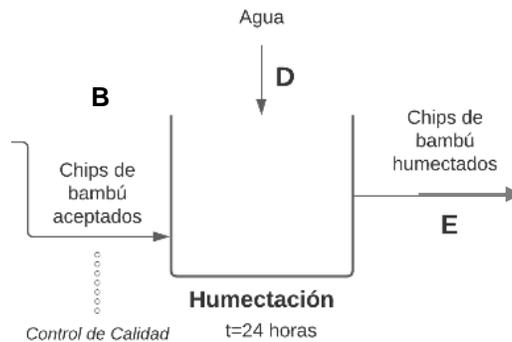
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.5, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.5. Entradas y salidas del tamizado de bambú**

Entradas	Salidas
$A'' = 10.8684 \text{ Kg de astillas secas}$	$B = 9.7815 \text{ Kg de astillas tamizadas}$
	$C = 0.9781 \text{ Kg de astillas recirculadas}$
	$P_2 = 0.1087 \text{ Kg de astillas secas}$

### c) Humectación

Al proceso de humectación es de 1:10 por lo que a los chips de bambú se les.



**Figura 5.6. Entradas y salidas en el proceso de humectación del bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.6 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$B + D = E \text{ (Ecuación 5.7)}$$

$$D = 10 * B * \rho_{agua} \text{ (Ecuación 5.8)}$$

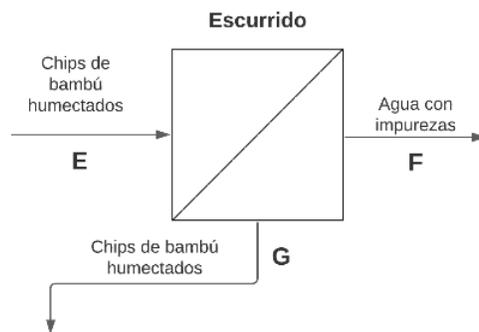
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.6, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.6. Entradas y salidas en el proceso de humectación del bambú**

Entradas	Salidas
$B = 9.7815 \text{ Kg de astillas tamizadas}$	$E = 107.2356 \text{ Kg de astillas humectadas}$
$D = 97.4541 \text{ Kg de agua}$	

**d) Ecurrido**

En esta etapa escurre el 97% del agua más el 1% de impurezas en las astillas y las astillas humectadas han absorbido el 3% del agua.



**Figura 5.7. Entradas y salidas en el proceso de escurrido del bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.7 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$F = 0.01 * B + 0.97 * D \text{ (Ecuación 5.9)}$$

$$G = 0.99 * B + 0.03 * D \text{ (ECUACIÓN 5.10)}$$

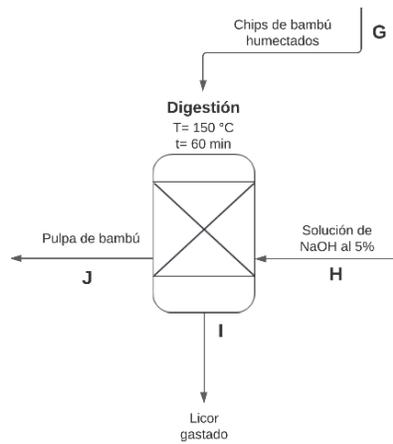
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.7, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.7. Entradas y salidas en el proceso de escurrido del bambú**

Entradas	Salidas
$E = 107.2356 \text{ Kg de astillas humectadas}$	$F = 94.6283 \text{ Kg de agua con impurezas}$
	$G = 12.6073 \text{ Kg de astillas humectadas}$

**e) Digestión**

La relación del licor blanco con la pulpa también es de 1:10. Según Chiluiza et al., 2009, el rendimiento de la digestión es de 54.20% bajo las condiciones de  $T=150$  °C,  $t = 60$  minutos.



**Figura 5.8. Entradas y salidas en el proceso de digestión del bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.8 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$R = \frac{Wp}{Wm-H} \text{ (Chiluiza et al., 2009) (ECUACIÓN 5.11)}$$

Donde:

$Wp$ : Peso de la pulpa secada a la estufa

$Wm$ : Peso de la muestra húmeda

H: Contenido de humedad

$$H = 10 * Astillas secas * \rho_{sln NaOH 5\%} \text{ (ECUACIÓN 5.12)}$$

$$I = (G + H) * 0.8 \text{ (ECUACIÓN 5.13)}$$

$$J = G + H - I \text{ (ECUACIÓN 5.14)}$$

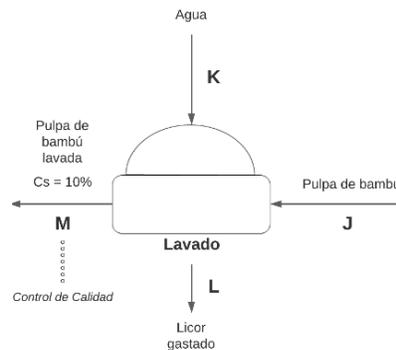
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.8, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.8. Entradas y salidas en el proceso de digestión del bambú**

Entradas	Salidas
$G = 12.6073 \text{ Kg de astillas humectadas}$	$I = 91.1430 \text{ Kg de licor gastado}$
$H = 101.3215 \text{ kg de solución de NaOH}$	$J = 22.7858 \text{ kg de pulpa de bambú}$

#### f) Lavado 1

Para el lavado se usan 4L por kg. Al igual que en el escurrido del lavado sale el 97% de lo ingresado con impurezas.



**Figura 5.9. Entradas y salidas en el proceso de lavado de la pulpa de bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.9 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$K = 4 * J * \rho_{agua} \text{ (ECUACIÓN 5.15)}$$

$$\%Cs = \frac{\text{Masa de la pulpa seca}}{\text{Masa de la pulpa húmeda}} * 100 \text{ (TAPPI, 2006) (ECUACIÓN 5.16)}$$

$$M = 0.99 * \text{Pulpa seca} + \frac{0.9 * \text{Masa de la pulpa seca}}{0.1} \text{ (ECUACIÓN 5.17)}$$

$$L = J + K - M \text{ (ECUACIÓN 5.18)}$$

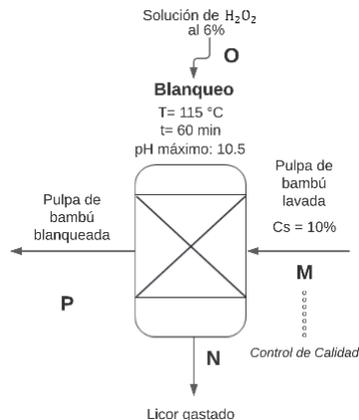
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.9, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.9. Entradas y salidas en el proceso de lavado de la pulpa de bambú**

Entradas	Salidas
$J = 22.7858 \text{ kg de pulpa de bambú}$	$M = 51.9610 \text{ kg de pulpa lavada}$
$K = 90.8069 \text{ kg de agua}$	$L = 61.6326 \text{ kg de licor gastado}$

### g) Blanqueo

En esta etapa se agrega solución de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 6% de 1:10 con un rendimiento de 86.8% a T=115 °C, t=60 min y la pulpa entra a una consistencia del 10%.



**Figura 5.10. Entradas y salidas en el proceso de blanqueo de la pulpa de bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.10 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$O = 10 * \text{masa de la pulpa seca} * \rho_{\text{sln } H_2O_2} \text{ (ECUACIÓN 5.19)}$$

$$\%Cs = \frac{\text{Masa de la pulpa seca}}{\text{Masa de la pulpa húmeda}} * 100 \text{ (ECUACIÓN 5.20)}$$

$$P = 0.868 * \text{Pulpa seca lavada} + \frac{0.85 * \text{Masa de la pulpa seca blanqueada}}{0.15} \text{ (ECUACIÓN 5.21)}$$

$$N = M + O - P \text{ (ECUACIÓN 5.22)}$$

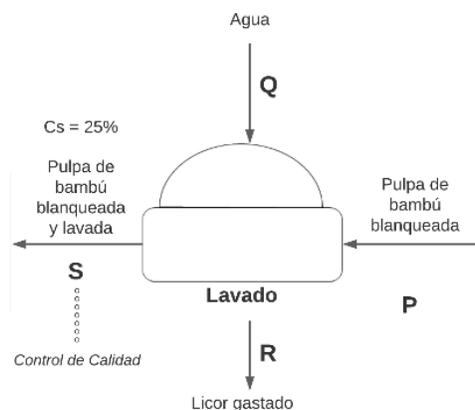
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.10, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.10. Entradas y salidas en el proceso de blanqueo de la pulpa de bambú**

Entradas	Salidas
$M = 51.9610$ kg de pulpa lavada	$P = 30.0680$ kg de pulpa blanqueada
$O = 52.8028$ Kg de sln de $H_2O_2$ al 6%	$N = 74.6958$ kg de licor gastado en <i>blanqueo</i>

### h) Lavado 2

Las condiciones de este lavado son iguales a las del lavado 1.



**Figura 5.11. Entradas y salidas en el proceso de lavado de pulpa de bambú blanqueada**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.11 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$Q = 4 * P * \rho_{H_2O} \text{ (ECUACIÓN 5.23)}$$

$$S = 0.99 * \text{Pulpa seca blanqueada} + \frac{0.75 * 4.4651 \text{ kg de masa seca del lavado}^2}{0.25} \text{ (ECUACIÓN 5.24)}$$

$$R = P + Q - S \text{ (ECUACIÓN 5.25)}$$

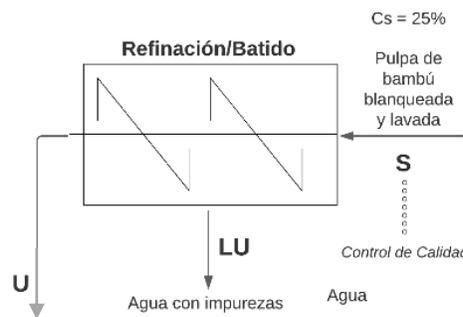
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.11, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.11. Entradas y salidas en el proceso de lavado de pulpa de bambú blanqueada**

Entradas	Salidas
$P = 30.0680$ kg de pulpa blanqueada	$S = 17.8604$ kg de pulpa
$Q = 119.8282$ kg de agua	$R = 132.0360$ kg de licor gastado

### i) Batido

En el proceso de batido o refinado se tienen pérdidas del 3%.



**Figura 5.12. Entradas y salidas en el proceso de batido de la pulpa de bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.12 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$U = 0.97 * \text{masa seca en } S + \frac{0.75 * \text{Masa seca en } S}{0.25} \text{ (ECUACIÓN 5.26)}$$

$$LU = S - U \text{ (ECUACIÓN 5.27)}$$

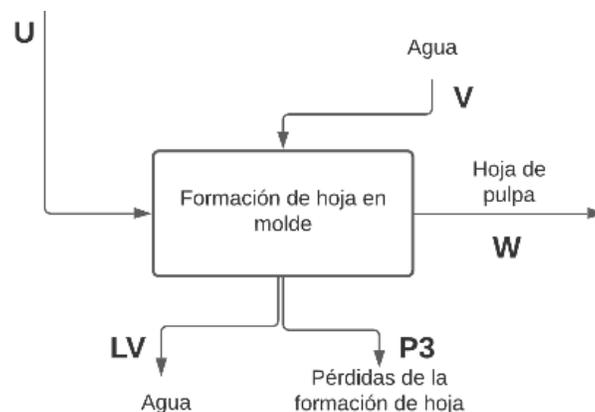
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.12, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.12. Entradas y salidas en el proceso de batido de la pulpa de bambú**

Entradas	Salidas
$S = 17.8604 \text{ kg de pulpa}$	$U = 17.3248 \text{ kg de pulpa batida}$
	$LU = 0.5356 \text{ kg de licor}$

### j) Formación de hojas

En el proceso de formación de hojas se tiene un 2% de pérdidas y se agrega agua a razón de 14L/kg



**Figura 5.13. Entradas y salidas en el proceso de formación de hoja de bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.13 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$V = 14 * \text{masa seca en } U * \rho_{H_2O} \text{ (ECUACIÓN 5.28)}$$

$$P3 = 0.02 * \text{masa seca en } U \text{ (ECUACIÓN 5.29)}$$

$$W = 0.98 * \text{masa seca en } U + \frac{0.75 * \text{masa seca en } W}{0.25} \text{ (ECUACIÓN 5.30)}$$

$$LV = U + V - W - P3 \text{ (ECUACIÓN 5.31)}$$

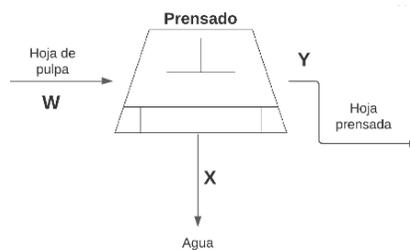
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.13, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.13. Entradas y salidas en el proceso de formación de hoja de bambú**

Entradas	Salidas
$U = 17.3248$ kg de pulpa batida	$W = 16.9781$ kg de hojas de pulpa
$V = 60.4130$ kg de agua	$LV = 60.6731$ kg de agua que sale
	$P3 = 0.0866$ kg de pulpa seca perdida

### k) Prensado

Del prensado resulta una pulpa de entre 33% y 55% de consistencia. Se consideró que la consistencia de salida sería del 55%.



**Figura 5.14. Entradas y salidas en el proceso de prensado de la hoja de pulpa de bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.14 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$Y = \text{masa seca en } W + \frac{0.45 * \text{Masa seca en } W}{0.55} \text{ (ECUACIÓN 5.32)}$$

$$X = \text{Agua inicial} - \text{Agua final} \text{ (ECUACIÓN 5.33)}$$

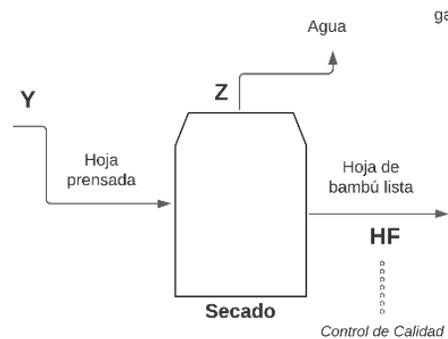
Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.6, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.14. Entradas y salidas en el proceso de prensado de la hoja de pulpa de bambú**

Entradas	Salidas
W = 16.9781 kg de hojas de pulpa	Y = 7.7174 kg de pulpa prensada
	X = 9.2610 kg de agua removida

### I) Secado

El proceso de secado tarda 48 horas y al final de este se obtiene el 94% de sólidos.



**Figura 5.15. Entradas y salidas del proceso de secado de la hoja de bambú**

Tomando en cuenta los datos de la tabla 5.3 y las especificaciones de la figura 5.15 se plantean las siguientes ecuaciones:

$$HF = \text{Masa de pulpa seca en } W - \frac{0.06 * \text{Masa de pulpa seca en } w}{0.94} \text{ (ECUACIÓN 5.34)}$$

$Z = \text{Masa de agua en pulpa prensada} - \text{Masa de agua en pulpa secada}$  ECUACIÓN 5.35)

Como resultado se obtienen las entradas y salidas descritas en la tabla 5.15, véase anexo 2 para verificar los cálculos.

**Tabla 5.15. Entradas y salidas en el proceso de secado de la hoja de bambú**

Entradas	Salidas
$Y = 7.7174$ kg de pulpa prensada	$HF = 4.5155$ kg de hojas de bambú
	$Z = 3.2019$ kg de agua evaporada

En forma de resumen se presenta la tabla 5.15 de entradas y salidas para todas las etapas del proceso de extracción de pulpa celulósica.

Tabla 5.16. Cuadro resumen de entradas y salidas en el proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú

Proceso	Entrada	Salida
Trituración	$A = 10 \text{ Kg de astillas}$	$A'' = 10.8683 \text{ Kg de astillas trituradas}$
	$C = 0.9781 \text{ Kg de astillas}$	$P_1 = 0.1098 \text{ Kg de astillas perdidos}$
	$A' = 10.9781 \text{ Kg de astillas}$	
Tamizado	$A'' = 10.8684 \text{ Kg de astillas secas}$	$B = 9.7815 \text{ Kg de astillas tamizadas}$
		$C = 0.9781 \text{ Kg de astillas recirculadas}$
		$P_2 = 0.1087 \text{ Kg de astillas secas}$
Humectación	$B = 9.7815 \text{ Kg de astillas tamizadas}$	$E = 107.2356 \text{ Kg de astillas humectadas}$
	$D = 97.4541 \text{ Kg de agua}$	
Ecurrido	$E = 107.2356 \text{ Kg de astillas humectadas}$	$F = 94.6283 \text{ Kg de agua con impurezas}$
		$G = 12.6073 \text{ Kg de astillas humectadas}$
Digestión	$G = 12.6073 \text{ Kg de astillas humectadas}$	$I = 91.1430 \text{ Kg de licor gastado}$
	$H = 101.3215 \text{ kg de solución de NaOH}$	$J = 22.7858 \text{ kg de pulpa de bambú}$
Lavado 1	$J = 22.7858 \text{ kg de pulpa de bambú}$	$M = 51.9610 \text{ kg de pulpa lavada}$
	$K = 90.8069 \text{ kg de agua}$	$L = 61.6326 \text{ Kg de licor gastado}$
Blanqueo	$M = 51.9610 \text{ kg de pulpa lavada}$	$P = 30.0680 \text{ kg de pulpa blanqueada}$
	$O = 52.8028 \text{ kg de sln de } H_2O_2 \text{ al } 6\%$	$N = 74.6958 \text{ kg de licor gastado en blanqueo}$
Continúa...		

**Tabla 5.16. Cuadro resumen de entradas y salidas en el proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú (Continuación)**

Proceso	Entrada	Salida
Lavado 2	P = 30.0680 kg de pulpa blanqueada	S = 17.8604 kg de pulpa
	Q = 119.8282 kg de agua	R = 132.0360 kg de licor gastado
Batido	S = 17.8604 kg de pulpa	U = 17.3248 kg de pulpa batida
		LU = 0.5356 kg de licor
Formación de hojas	U = 17.3248 kg de pulpa batida	W = 16.9781 kg de hojas de pulpa
	V = 60.4130 kg de agua	LV = 60.6731 kg de agua que sale
		P3 = 0.0866 kg de pulpa seca perdida
Prensado	W = 16.9781 kg de hojas de pulpa	Y = 7.7174 kg de pulpa prensada
		X = 9.2610 kg de agua removida
Secado	Y = 7.7174 kg de pulpa prensada	HF = 4.5155 kg de hojas de bambú
		Z = 3.2019 kg de agua evaporada

#### **5.4.7 Selección y dimensionamiento de equipos para el proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú**

Se evaluó las opciones de equipo y maquinaria que puedan ser utilizados para el proceso de extracción de pulpa celulósica, para finalmente elegir la mejor alternativa para una producción semanal con una alimentación de 10 kg/semana. Los equipos son agrupados por la actividad que realizan dentro del proceso, para luego ser evaluados de acuerdo a sus características y finalmente elegir el más idóneo para la actividad. El siguiente listado toma en cuenta las especificaciones técnicas del equipo y la naturaleza de su funcionamiento, las cuales serán investigadas y evaluadas con el fin de asegurar los objetivos de este estudio.

- a) Actividad a realizar.
- b) Capacidad de producción.
- c) Parámetros de control.
- d) Consumo de energía.
- e) Generación de residuos.

##### **a) Selección del equipo para el almacenamiento del bambú**

El almacenamiento del bambú permite tener la disponibilidad de la materia prima para su procesamiento, y en la medida que se desarrolle un sistema de abastecimiento se podrá mantener un ritmo de producción estable. El bambú adquirido puede tener humedad y el almacenaje debe permitir que pueda secarse. De acuerdo a los objetivos de este estudio se define que el almacenamiento estará conformado por un espacio que resguarde a la madera la lluvia y del sol, que permita el flujo de circulación de aire y que tenga el suficiente espacio para colocar el bambú, por lo que una bodega, cuarto o cabaña que cumpla con los requisitos anteriores podrá ser utilizada como espacio de almacenamiento.

**b) Selección del equipo para el triturado y tamizado del bambú.**

La trituración y el tamizado son un proceso en secuencia y de retroalimentación, se procura que el triturado cumpla con el criterio de 2 x 2 cm para tener el mayor rendimiento de la materia prima.

**Tabla 5.17. Equipos de trituración para el bambú**

Criterio	Sun Joe CJ602E	Earthwise GS70015
		
Capacidad de producción	12 kg/h aprox.	24 kg/h aprox.
Tamaño de chips	20 mm	20 mm
Consumo de energía	1.8 kW	1.8 kW
Generación de residuos	Alto	Mínimo
Dimensiones	50.01 x 43.99 x 96.01 cm	60 x 45.72 x 106.68 cm
Precio	\$147.00	\$164.98

Ambos equipos necesitan que los culmos sean cortados en al menos 6 partes de forma radial para disminuir su tamaño y que sean procesados eficientemente, también ambos cumplen con el tamaño necesario de los chips de bambú, sin embargo, para tener precios similares su diferencia radica en la capacidad de los mismos y su eficiencia. Solamente se necesitan procesar 10 kg de bambú por lo que se elige el modelo Sun Joe CJ602E.

**c) Selección del equipo para la digestión de los chips del bambú y de blanqueo**

La digestión se lleva a cabo en una olla de acero, la cual debe tener la capacidad de 150 litros. Se hizo una comparación entre la opción artesanal y la opción industrial, para la primera el sistema se compone de una olla de acero y una cocina, y la segunda opción se plantea un hervidor eléctrico.

**Tabla 5.18. Equipos para la digestión del bambú**

Criterio	Sistema Olla-Cocina	Hervidor eléctrico /PBOT15GWCO
		
Capacidad de producción	150L	150L
Parámetros de control	~200 °C	~150 °C
Consumo de energía	No aplica	24.2 kW
Generación de residuos	Mínimos	Mínimos
Precio	\$387.04	\$28,068.00

La opción elegida es la del sistema olla-cocina, ya que esta opción presenta la misma capacidad que la del hervidor eléctrico a un precio mucho menor y a nivel artesanal este criterio es de gran importancia, aunque no se tenga mucho control en el proceso.

**d) Selección del equipo para el lavado de la pulpa de bambú**

El lavado de la pulpa se puede realizar a través de dos opciones, una artesanal y una industrial. El método artesanal se realiza con bolsas de tela o depósitos para almacenar la pulpa, se adiciona agua común, donde se hace un enjuague de la pulpa hasta que el agua residual que se obtiene en el proceso sea lo más clara posible. La opción industrial consiste en el uso de una maquinaria cuyo objetivo es específico para el tratamiento de la pulpa, donde se obtiene el mismo resultado que la artesanal, con la ventaja de mayor facilidad de lavado y una producción mayor.

**Tabla 5.19. Equipos para el lavado de la pulpa de bambú**

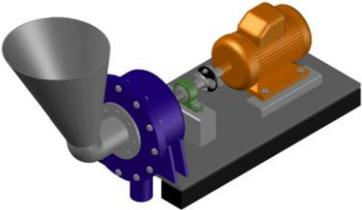
Criterio	Olla con cesta	GMGX1-7
		
Capacidad de producción	150 L	Hasta 20 ton/día
Parámetros de control	No aplica	No aplica
Consumo de energía	0	7.5 kW
Generación de residuos	Mínimos	Mínimos
Precio	\$199.98	\$10,000

De acuerdo con el análisis de los criterios el equipo a utilizar es la olla con cesta, ya que la máquina GMGX1-7 permite procesar 20 toneladas por día de pulpa, sin embargo, este valor sobrepasa el requerido por el proceso y la capacidad de producción del depósito sencillo es suficiente.

**e) Selección del equipo para el batido y refinado de la pulpa de bambú**

Para el refinado y batido de la pulpa blanqueada industrialmente sólo se encuentra equipo especializado para tener una superficie uniforme en el papel y evitar grumos, por lo que se solicitó el diseño de un equipo a la medida para evitar el sobredimensionamiento del mismo.

**Tabla 5.20. Equipos para refinado de la pulpa de bambú**

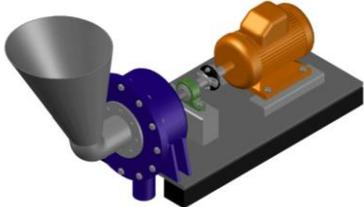
Criterio	Refinadora a la medida	ZDPH-330
		
Capacidad de producción	25 kg/día	5,000 – 10,000 kg/día
Parámetros de control	10 - 30% consistencia	10 - 30% consistencia
Consumo de energía	0.37 kWh	11 - 22 kW
Generación de residuos	Mínimos	Mínimos
Dimensiones	91.63 x 30 x 47.5 cm	3.5 x 1 x 1 m aprox
Precio	\$1,053.05	\$2,000.00 - \$11,000.00

Ya que se tiene un equipo diseñado a la medida por consiguiente este es el más adecuado para el proceso, también se ve reflejada la ventaja de la máquina a la medida en cuanto al precio.

Tabla 5.21. Resumen de equipos seleccionados para producción de papel de bambú

Equipo	Especificaciones	
<b>Trituración</b>		
<b>Sun Joe CJ602E</b>	Capacidad de producción	12 kg/h
	Parámetros de control	20 mm
	Consumo de energía	1.8 kW
	Generación de residuos	Alto
	Dimensiones	50.01 x 43.99 x 96.01 cm
	Precio	\$147.00
<b>Digestión</b>		
<b>Olla + Cocina</b>	Capacidad de producción	150L
	Parámetros de control	~200 C
	Consumo de energía	No aplica
	Generación de residuos	0
	Precio	\$387.04
		Continuación...

Tabla 5.21. Resumen de equipos seleccionados para producción de papel de bambú (Continuación)

Equipo		Especificaciones	
<b>Lavado</b>			
<b>Depósito artesanal</b>	Capacidad de producción	150 L	
	Parámetros de control	No aplica	
	Consumo de energía	0	
	Generación de residuos	Mínimos	
	Precio	\$199.98	
<b>Refinado</b>			
<b>Refinadora a la medida</b>			
	Capacidad de producción	5 - 10 toneladas por día	
	Parámetros de control	10 - 30% consistencia	
	Consumo de energía	0.37 kWh	
	Generación de residuos	Mínimos	
	Dimensiones	91.63 x 30 x 47.5 cm	
	Precio	\$1,053.05	
<b>Inversión total</b>		<b>\$1,787.07</b>	

Finalmente, con los equipos elegidos se tiene una inversión inicial de \$1,787.07.

## **5.5 Metodología de control de calidad del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú**

Las materias primas se prueban para determinar si las entregas son de la cantidad y calidad especificadas en el pedido de compra, también para determinar si son satisfactorias para el uso o si hay que efectuar algún cambio en el proceso para su mejor utilización. De igual forma, dentro del proceso se deben tomar puntos de control para medir la eficiencia de los mismos y poder realizar mejoras.

### **5.5.1 Control de calidad del bambú**

El control de calidad para las materias primas consiste más que todo en conocer su composición lignocelulósica, la cual puede cambiar dependiendo la madurez de los culmos.

#### **a) Pruebas de humedad, utilizando la norma TAPPI T 1 m-58**

El contenido de humedad es la cantidad de agua que contiene una muestra en el momento de efectuar el análisis. En la práctica se considera como humedad la pérdida de peso que experimenta la muestra después de secarla hasta el peso constante, de acuerdo a condiciones normalizadas.

#### **PROCEDIMIENTO:**

- 1) Pesar las muestras de no menos de 2 gramos ni más de 50 gramos.
- 2) Colocar la muestra en la estufa a  $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante 1 a 2 horas.
- 3) Transferir la muestra a un desecador y enfriar hasta temperatura ambiente.
- 4) Pesar la muestra y anotar el dato.
- 5) Repetir los pasos anteriores hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas no exceda el 0.1% del peso inicial de la muestra.

CALCULO:

$$H = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100$$

DONDE:

H= Contenido de humedad expresado en porcentaje con respecto inicial de la muestra

M1= Peso inicial de la muestra, en gramos

M2= Peso final de la muestra, en gramos

**b) Cantidad de cenizas, utilizando la norma TAPPI T 15 os-58**

El contenido de la muestra puede consistir en: diversos residuos de productos químicos utilizados en su manufactura, materias metálicas procedentes de las tuberías y la maquinaria, materias minerales presentes en la pasta con la que se ha fabricado el papel, entre otros.

PROCEDIMIENTO:

- 1) Limpiar cuidadosamente un crisol vacío y encenderlo en un horno de mufla a  $525 \pm 25^{\circ}\text{C}$  durante 30-60 minutos. Después de la ignición, enfriar ligeramente y colocar en un desecador, que contenga alúmina anhidra de grado indicador. Una vez enfriado a temperatura ambiente, pesar el crisol en balanza analítica con una precisión de 0.1 mg.
- 2) Transferir la muestra de ensayo al crisol y, con la tapa entreabierta, carbonizar suavemente la muestra en el crisol en el hogar del horno o directamente sobre la llama baja de un mechero bunsen. Alternativamente, colocar el crisol, con tapa, en un horno a unos  $100^{\circ}\text{C}$ . Aumentar la temperatura a  $525^{\circ}\text{C}$  lentamente para que la muestra se carbonice sin que se incendie. Cuando el residuo haya dejado de carbonizarse, coloque el crisol

con la muestra en el horno a  $525 \pm 25^{\circ}\text{C}$  y retire la tapa cuando el crisol parezca haber alcanzado la temperatura del horno.

- 3) Cuando la muestra esté completamente carbonizada, como indica la ausencia de partículas negras, retirar el crisol del horno, volver a colocar la tapa y se deja enfriar un poco; a continuación, colocar en un desecador que contenga alúmina anhidra de calidad indicada y se enfría a temperatura ambiente. Pesar el crisol con la ceniza con una precisión de 0.1 mg. Repetir la ignición y el pesaje hasta que el peso de la ceniza sea constante con una precisión de  $\pm 0.2$  mg.

CÁLCULO:

$$\% \text{ Ceniza} = \frac{Ax100}{B}$$

DONDE:

A = peso de la ceniza, g

B = peso de la muestra de ensayo, g sin humedad

**c) Cantidad de celulosa, utilizando el método modificado de Kurschner y Hoffer**

Conocer el contenido de celulosa de la materia es de gran importancia ya que este es el componente principal que queremos preservar durante todo el proceso para obtener la pulpa.

PROCEDIMIENTO:

- 1) Adicionar a 1g de madera anhidra libre de extractos, una mezcla formada por etanol y ácido nítrico concentrado en relación 4:1

- 2) Llevar a reflujo en baño maría durante 30 minutos y filtrar repitiendo este proceso dos veces.
- 3) Al residuo realizarle un lavado con agua destilada caliente por una hora.
- 4) Someter la muestra a un lavado con una solución saturada de acetato de sodio, seguido de agua destilada caliente.
- 5) Secar a una temperatura de 105°C, enfriar en un desecador y pesar.

CÁLCULO:

$$\% \text{ Celulosa} = \frac{Por}{Po} \times 100$$

DONDE:

*Por* = Peso seco del residuo

*Po* = Peso anhidro de la muestra

**d) Cantidad de lignina, utilizando la norma TAPPI T 222 os-74.**

La lignina es el compuesto que queremos extraer de la masa de chips iniciales, este no es un producto deseable al final del proceso, aunque su remoción no es total es importante conocer el contenido de lignina de la materia prima.

PROCEDIMIENTO:

- 1) Añadir a los vasos de precipitados que contienen las muestras de ensayo de ácido sulfúrico al 72% en frío (10 a 15°C), 15 ml para una madera y 40 ml para una muestra de pulpa. Añadir el ácido gradualmente en pequeños incrementos mientras se agita y se macera el material con una varilla de vidrio. Mantener el vaso de precipitados en un baño a  $2 \pm 1^\circ\text{C}$  durante la dispersión del material.

- 2) Una vez dispersada la muestra, cubrir el vaso de precipitados con un vidrio de reloj y manténgalo en un baño a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  durante 2 h. Agitar el material con frecuencia durante este tiempo para asegurar una solución completa.
- 3) Añadir unos 300 a 400 ml de agua a un matraz y transferir el material del vaso de precipitados al matraz. Aclarar y diluir con agua hasta alcanzar una concentración del 3% de ácido sulfúrico, hasta un volumen total de 575 mL para la madera, y de 1540 ml para las pulpas.
- 4) Hervir la solución durante 4 h, manteniendo el volumen constante mediante un condensador de reflujo o añadiendo frecuentemente agua caliente.
- 5) Dejar que el material insoluble (lignina) se asiente, manteniendo el matraz en posición inclinada. Si la lignina está finamente dispersa, puede requerir una "noche" o un período más largo para asentarse.
- 6) Sin agitar el precipitado, decantar o sifonear la solución sobrenadante a través de un crisol filtrante. A continuación, transferir la lignina cuantitativamente al filtro, utilizando agua caliente y una varilla con policia de goma.
- 7) Lavar la lignina libre de ácido con agua caliente.
- 8) Secar el crisol con lignina en una estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  hasta alcanzar un peso constante. Enfriar en un desecador y pesar.

CÁLCULOS:

$$\% \text{ Lignina} = \frac{A}{W} * 100$$

DONDE:

A = peso de la lignina, g

W = peso de la muestra de prueba secado en horno, g

### **5.5.2 Control de calidad para la pulpa celulósica**

Además, del rendimiento del proceso se pueden realizar varias pruebas a la pulpa celulósica para saber cómo ha cambiado su composición lignocelulósica durante el proceso. Además, se agrega también el análisis del licor negro como parte de los controles del proceso.

#### **a) Cantidad de alfa celulosa presente en la pulpa celulósica de bambú según lo indica el método TAPPI T203**

La determinación de la alfa-, beta- y gamma-celulosa sólo puede aplicarse a las pulpas blanqueadas o deslignificadas. Las pastas no blanqueadas y semiblanqueadas deben ser delignificadas antes de la prueba.

PROCEDIMIENTO:

- 1) Pipetear 25 ml del filtrado y 10 ml de solución de dicromato potásico 0.5N en un matraz de 250 ml.
- 2) Añadir con precaución, mientras se agita el matraz, 50 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> concentrado
- 3) Dejar que la solución permanezca caliente durante 15 minutos, luego añadir 50 ml de agua y enfriar a temperatura ambiente.
- 4) Añadir de 2 a 4 gotas de indicador de ferroína y valorar con una solución de sulfato amónico ferroso 0.1N hasta obtener un color púrpura.
- 5) Hacer una valoración en blanco sustituyendo el filtrado de la pulpa por 12.5 ml de NaOH al 17.5% y 12.5 ml de agua.

CÁLCULO:

$$\% \text{ alfa} - \text{celulosa} = \frac{6.85x(V^2 - V^1)xNx20}{AxW}$$

DONDE:

$V^1$  = valoración del filtrado de la pulpa, ml

$V^2$  = valoración del blanco, ml

$N$  = normalidad exacta de la solución de sulfato amónico ferroso

$A$  = volumen del filtrado de pulpa utilizado en la oxidación, ml

$W$  = peso de la muestra de pulpa secada en horno, g

**b) Cantidad de lignina, utilizando el método del Número Kappa, según lo indica el método TAPPI T236**

El número de Kappa es una medida del grado de deslignificación de la pulpa y de la facilidad de blanqueo que tiene la misma.

PROCEDIMIENTO:

- 1) Pesar  $1.2 \pm 0.05$  gramos de muestra base seca
- 2) Dividir la muestra en pedazos pequeños y dejarla en agua durante 5 minutos
- 3) Desintegrar la muestra durante 2 minutos en una licuadora con 300 ml de agua destilada.
- 4) Pasar la muestra licuada a un beaker de 2000 ml y agregarle 100 ml de  $H_2SO_4$  4.0N y 100 ml de  $KMnO_4$  0.1N. Mantener la solución en agitación constante a  $25 \pm 0.5^\circ C$  durante 10 min.
- 5) Al terminar los 10 minutos, agregar 20 ml de KI 1.0N y unas gotas de indicador de almidón, luego titular con tiosulfato de sodio 0.2N. La titulación termina cuando aparece la coloración blanca
- 6) Repetir la marcha para dos blancos

CALCULO:

$$K = \frac{P \times F}{W}$$

$$P = \frac{N(b-a)}{0.1} \quad F = 10^{-0.00093(p-50)}$$

DONDE:

K= Número de Kappa

b= volumen de tiosulfato de sodio consumido en el blanco (ml)

a= Volumen de tiosulfato de sodio consumido por la muestra (ml)

N= Normalidad del tiosulfato de sodio

W= Peso de la muestra (g)

### **c) Humedad de equilibrio en pulpas según la norma TAPPI T 550**

La humedad de la pulpa y el papel puede afectar al rendimiento y propiedades del papel entre ellas la resistencia a la tracción y desgarró. Por lo que es un parámetro importante de conocer.

PROCEDIMIENTO:

- 1) Pesar la muestra en el frasco de pesaje seco tarado con una precisión de un miligramo, colocarlo en la estufa de secado, retirar el tapón y calentar durante unos 30 minutos; para gramajes superiores a 224 g/m<sup>2</sup> calentar durante 1 h.
- 2) Volver a tapar el frasco, sacarlo de la estufa, enfriarlo a temperatura ambiente en un desecador, aflojar el aflojar el tapón momentáneamente para permitir la entrada de aire y volver a pesar. Realice este paso de pesaje dentro de los 30 minutos siguientes a la retirada de la botella de la estufa para evitar la reabsorción de vapor de agua por el papel.
- 3) Después de un período de secado inicial, utilizar un segundo período de secado, por lo menos igual al primero, y períodos de secado subsiguientes, cada uno de los cuales es por lo menos la mitad del total de todos los

períodos de secado anteriores, hasta que dos pesajes sucesivos hasta que dos pesadas sucesivas no difieran en más del 0.1% del peso del espécimen.

Durante estos periodos no se deben introducir nuevas muestras en la estufa.

- 4) Calcular la humedad de cada muestra como el porcentaje de pérdida del peso original, con una precisión del 0.1%.

CÁLCULO:

$$\% \text{ humedad} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_t} \times 100$$

DONDE:

$W_2$  = peso de la botella y de la muestra antes del secado

$W_1$  = peso de la botella y de la muestra después del secado

$W_t$  = peso de tara de la botella

#### **d) Análisis de licor residual según la norma TAPPI T 625.**

El objeto de este método es conocer la concentración final del reactivo químico empleado en la cocción del material fibroso investigado. La determinación se realiza por vía potenciométrica con ácido clorhídrico 0.1N hasta alcanzar un pH de 8.2, que corresponde al punto de viraje de fenolftaleína, para calcular el porcentaje de álcali residual.

PROCEDIMIENTO:

- 1) Tomar una alícuota de 10 ml de licor negro y transferirlo a un beaker de 150 ml, al que se le coloca un agitador magnético para mantener en movimiento la solución.
- 2) Introducir en la solución un electrodo medidor de pH, con el objeto de determinar al punto final de la titulación.
- 3) Titular la solución con ácido clorhídrico al 0.1N, manteniendo agitada la solución e inmerso en ella el electrodo.

- 4) Cuando se alcanza el pH de 8.2 termina la titulación y se toma dato de la cantidad de ácido clorhídrico gastado.

$$\text{CALCULO: } Z = \frac{(a)(b)(Me)(Vt)}{(W)(c)} \times 100$$

DONDE:

Z= Porcentaje de licor residual (p/p)

A= normalidad de ácido clorhídrico

B= volumen gastado de ácido clorhídrico (ml)

Vt= Volumen de agua en el digestor al inicio de la cocción de la pulpa

W= Peso de la muestra seca en el digestador al inicio de la cocción.

C= Alícuota del licor negro tomado para el análisis (ml)

Me= Miliequivalente de Na<sub>2</sub>O.

## **5.6 Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú**

Se identificaron y definieron los aspectos e impactos ambientales posibles que se generan en las diferentes etapas del proceso contempladas anteriormente; esto con la finalidad de tener un panorama real acerca de la viabilidad proceso ante la máxima autoridad ambiental salvadoreña, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

### **5.6.1 Identificación de los aspectos ambientales del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú.**

Para estimar los impactos que se generarían por la producción de papel a partir de la extracción de la pulpa celulósica del bambú, se analizaron varios elementos: las entradas y salidas de cada una de las operaciones unitarias, la recepción y almacenamiento de materia prima, análisis de laboratorio (para controles rutinarios o de

control de calidad), etc. Los cuales son caracterizados y relacionados en la tabla 5.21.

**Tabla 5.22. Identificación de los aspectos ambientales resultantes de la producción de papel a partir del bambú**

Etapa	Descripción del impacto ambiental potencial
<b>Recepción y selección</b>	Generación de residuos tóxicos y peligrosos por análisis de laboratorio por control de calidad.
	Generación de residuos orgánicos por el descarte de bambú de mala calidad.
	Aumento en la demanda energética por los equipos.
	Generación de aguas residuales provenientes de los laboratorios.
	Riesgo a la seguridad e higiene ocupacional por exposición a químicos peligrosos.
<b>Almacenamiento</b>	Riesgo a la seguridad e higiene ocupacional por movimiento de culmos pesados
<b>Trituración y tamizado</b>	Aumento en la demanda energética por la trituradora
	Riesgo a la seguridad e higiene ocupacional por exposición a polvillo y emisiones de niveles de presión sonora.
<b>Humectación</b>	Aumento de la demanda hídrica por la humectación de las astillas de bambú
<b>Escurrido</b>	Generación de aguas residuales con presencia de sólidos
<b>Digestión</b>	Aumento en la demanda energética por calentamiento de la mezcla.
	Generación de aguas residuales (Licor gastado).
	Riesgo a la seguridad e higiene ocupacional por exposición a superficies calientes y químicos corrosivos.
Continúa...	

**Tabla 5.22. Identificación de los aspectos ambientales resultantes de la producción de papel a partir del bambú (Continuación)**

Etapa	Descripción del impacto ambiental potencial
<b>Lavado</b>	Aumento de la demanda hídrica para el lavado de la pulpa
	Generación de aguas residuales provenientes de los laboratorios y de la extracción del licor gastado
	Riesgo a la seguridad e higiene ocupacional por exposición a químicos peligrosos.
<b>Blanqueo</b>	Aumento en la demanda energética por calentamiento de la mezcla.
	Generación de aguas residuales (Licor gastado).
	Riesgo a la seguridad e higiene ocupacional por exposición a químicos peligrosos.
<b>Refinación</b>	Aumento en la demanda energética por los equipos utilizados.
	Generación de aguas residuales de licor gastado de la refinación
<b>Formación de hoja</b>	Generación de aguas residuales por el descarte de licor gastado.
	Riesgo a la seguridad e higiene ocupacional por exposición a químicos peligrosos
<b>Prensado</b>	Generación de aguas residuales del prensado de la hoja
	Riesgo a la seguridad e higiene ocupacional por movimiento de objetos pesados
<b>Secado</b>	Generación de residuos tóxicos y peligrosos por análisis de laboratorio en el control de calidad.

### 5.6.2 Descripción de los impactos ambientales del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú

A partir de los aspectos ambientales identificados, se procedió a identificar factores e impactos ambientales.

Tabla 5.23. Identificación de impactos ambientales de la producción de papel a partir del bambú

COMPONENTE AMBIENTAL	ETAPAS DEL PROCESO FACTORES IMPACTADOS	Recepción y selección	Almacenamiento	Trituración y tamizado	Humectación y escurrido	Digestión	Lavado	Blanqueo	Refinación	Formación de hoja	Prensado	Secado
		<b>AGUA</b>	<b>Contaminación del agua superficial</b>	X			X	X	X	X	X	X
	<b>Contaminación de mantos acuíferos subterráneos</b>	X			X	X	X	X	X	X	X	X
<b>AIRE</b>	<b>Contaminación directa del aire</b>			X								
	<b>Contaminación indirecta del aire</b>	X		X		X		X	X			
<b>SUELO</b>	<b>Contaminación del suelo</b>	X			X	X						
<b>FLORA</b>	<b>Pérdida de vegetación</b>	X										
<b>FAUNA</b>	<b>Pérdida de fauna acuática</b>	X			X	X		X		X	X	
<b>SOCIAL</b>	<b>Seguridad e higiene ocupacional</b>	X	X	X		X	X	X		X	X	
	<b>Generación de empleo</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabla 5.24. Identificación de impactos ambientales negativos y positivos de la producción de papel a partir del bambú

COMPONENTE AMBIENTAL	ETAPAS DEL PROCESO FACTORES IMPACTADOS	Recepción y selección	Almacenamiento	Trituración y tamizado	Humectación y escurrido	Digestión	Lavado	Blanqueo	Refinación	Formación de hoja	Prensado	Secado	Positivos	Negativos
AGUA	Contaminación del agua superficial	N			N	N	N	N	N	N	N	N	0	9
	Contaminación de mantos acuíferos subterráneos	N			N	N	N	N	N	N	N	N	0	9
AIRE	Contaminación directa del aire			N									0	1
	Contaminación indirecta del aire	N		N		N		N	N				0	5
SUELO	Contaminación del suelo	N			N	N							0	3
FLORA	Pérdida de vegetación	N											0	1
FAUNA	Pérdida de fauna acuática	N			N	N		N		N	N		0	6
SOCIAL	Seguridad e higiene ocupacional	N	N	N		N	N	N		N	N		0	8
	Generación de empleo	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	11	0
	Positivos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	
	Negativos	7	1	3	4	6	3	5	3	4	4	2		42

Tabla 5.25. Numeración de impactos ambientales negativos de la producción de papel a partir del bambú

COMPONENTE AMBIENTAL	FACTORES IMPACTADOS	ETAPAS DEL PROCESO												Positivos	Negativos
		Recepción y selección	Almacenamiento	Trituración y tamizado	Humectación y escurrido	Digestión	Lavado	Blanqueo	Refinación	Formación de hoja	Prensado	Secado	Positivos		
AGUA	Contaminación del agua superficial	1			12	16	22	25	30	33	37	41	0	9	
	Contaminación de mantos acuíferos subterráneos	2			13	17	23	26	31	34	38	42	0	9	
AIRE	Contaminación directa del aire			9									0	1	
	Contaminación indirecta del aire	3		10		18		27	32				0	5	
SUELO	Contaminación del suelo	4			14	19							0	3	
FLORA	Pérdida de vegetación	5											0	1	
FAUNA	Pérdida de fauna acuática	6			15	20		28		35	39		0	6	
SOCIAL	Seguridad e higiene ocupacional	7	8	11		21	24	29		36	40		0	8	
	Generación de empleo	Impactos positivos											11	0	
	Positivos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11	
Negativos	7	1	3	4	6	3	5	3	4	4	2			42	

El artículo 5 de la Ley de Medio Ambiente de la República de El Salvador define al impacto ambiental como: “cualquier alteración significativa, positiva o negativa, de uno o más de los componentes del ambiente, provocadas por acción humana o fenómenos naturales en un área de influencia definida.”. Por lo tanto, las actividades antropogénicas del proceso que encajan dentro de este concepto son las siguientes:

**a) Contaminación del agua**

La contaminación del agua es el principal problema que se deriva de los procesos de fabricación de papel, ya que se usan grandes cantidades del recurso hídrico y luego del proceso esta agua residual puede contaminar el agua superficial (1, 12, 16, 22, 25, 30, 33, 37 y 41), la infiltración de la misma en el suelo puede provocar también la contaminación de mantos acuíferos (2, 13, 17, 23, 26, 31, 34, 38 y 42) alterando su calidad y restringiendo su uso.

**b) Contaminación del aire**

La contaminación del aire se refiere a la presencia de elementos nocivos que degraden su calidad y afecten directa o indirectamente a cualquier forma de vida. La contaminación directa al aire (9) se manifiesta en la suspensión de partículas sólidas de bambú en el aire en la etapa de la trituración, mientras que la contaminación indirecta del aire (3, 10, 18, 27 y 32) se da por el aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero en toda aquella actividad que requiera energía eléctrica.

**c) Contaminación del suelo**

La contaminación del suelo (4, 14 y 19) es un fenómeno donde su calidad ha sido alterada como consecuencia del vertido directo o indirecto de residuos o productos tóxicos y peligrosos.

#### **d) Pérdida de flora y fauna**

La pérdida de flora (5) se da por el uso del recurso *Guadua angustifolia* y la pérdida de fauna acuática (6, 15, 20, 28, 35 y 39) es posible que suceda si hay vertido de aguas residuales en cuerpos receptores.

#### **e) Afectación social**

Este aspecto está enfocado en los trabajadores, si bien hay un impacto positivo en todas las etapas del proceso por la generación de empleo también se presentan riesgos de seguridad y salud ocupacional (7, 8, 11, 21, 24, 29, 36 y 40).

### **5.6.3 Resultados y análisis de la evaluación de impacto ambiental del proceso de extracción de pulpa celulósica de bambú**

Por medio de la evaluación de impacto ambiental realizada con el método cuantitativo de criterios relevantes se obtuvo los resultados de la tabla 5.26, con un VIA global de 6.52 siendo este ALTO. La contaminación del agua superficial y la contaminación indirecta del aire (ambas categorías I, MUY ALTA) son los principales problemas medioambientales que se deben evitar del proceso de obtención de papel a partir del bambú, por ello el programa de manejo ambiental (PMA) debe contemplar el tratamiento de aguas residuales y la evaluación de utilización de energías limpias. La contaminación de mantos acuíferos subterráneos y la pérdida de fauna acuática resultaron con una significancia ALTA, lo que reitera la importancia del tratamiento de efluentes complementada con impermeabilización del suelo. En la categoría III MEDIA se encuentran la contaminación del suelo, reiterando la necesidad de impermeabilización y gestión de residuos sólidos; pérdida de vegetación, para lo cual se debe asegurar que la materia prima proviene de un cultivo gestionado sosteniblemente; y riesgo a la seguridad e higiene ocupacional, para lo cual se debe brindar equipo de protección personal (EPP). Finalmente, los impactos ambientales que recaen en la categoría IV BAJA, aunque siempre es importante monitorearlos, no representarán mucho problema para nuestro caso de estudio.

Tabla 5.26. Evaluación de impactos ambientales de la extracción de pulpa celulósica de bambú

IMPACTO AMBIENTAL	INTENSIDAD	EXTENSIÓN	DURACIÓN	MAGNITUD	REVERSIBILIDAD	RIESGO	VIA	SIGNIFICANCIA	CATEGORÍA
Contaminación del agua superficial	9	10	10	9.6	10	10	9.75	MUY ALTA	I
Contaminación de mantos acuíferos subterráneos	9	6	10	8	10	5	7.76	ALTA	II
Contaminación directa del aire	3	10	2	5.6	2	2	3.75	BAJA	IV
Contaminación indirecta del aire	7	10	10	8.8	10	10	9.25	MUY ALTA	I
Contaminación del Suelo	5	4	8	5.2	4	5	4.88	MEDIA	III
Pérdida de especies vegetales	4	5	2	4	5	5	4.36	MEDIA	III
Pérdidas en la fauna acuática	8	8	5	7.4	10	5	7.40	ALTA	I
Seguridad e Higiene Ocupacional	5	5	5	5	5	5	5.00	MEDIA	III
<b>Promedio</b>							<b>6.52</b>	<b>ALTA</b>	<b>II</b>

## Conclusiones

- a) Existen distintos métodos de extracción de pulpa celulósica y aún se sigue investigando nuevas tecnologías para mejorar el rendimiento de los mismos. Estos pueden ser mecánicos, semi-químicos y químicos, para los procesos químicos se tienen los métodos kraft, sulfito y a la soda. El método kraft utiliza como licor en la digestión una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH), sulfuro de sodio (Na<sub>2</sub>S) y puede incluir impurezas de carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) a 160 – 180 °C durante 0.3 – 2 h dependiendo del grado de deslignificación requerido, además del consumo energético por el tiempo prolongado de la cocción, la mezcla utilizada produce licor negro que debe ser tratado posteriormente. El método al sulfito utiliza una mezcla ácida de ácido sulfuroso y de iones de bisulfito, en el pulpado al sulfito ácido se inicia entre los 70 a 80°C y se calienta lentamente hasta los 120°C, teniendo como temperaturas máximas de 130 a 145°C en 7 horas y pH de 1.2 a 1.5, mientras que el pulpado al bisulfito se lleva a cabo a temperaturas mayores de aproximadamente 170°C, durante 6 horas, en un rango de pH de 3 a 5, ambos procesos tienen un proceso mayor a 3 h de cocción lo que implica mayor consumo energético de todos los métodos. La especie de bambú *Guadua angustifolia* solo ha sido investigada para el proceso a la soda, donde se utiliza hidróxido de sodio con parámetros de temperatura de 150 °C en un tiempo de 60 minutos y son los únicos parámetros con los que se contaba teniendo un rendimiento de 54.20% a escala de laboratorio, el cual se asumió como válido para el proceso artesanal, este inevitablemente tiene un impacto ambiental si no se tratan los efluentes al igual que en el método kraft. En cuanto a la materia prima, esta no representa un gran cambio en la sostenibilidad del proceso ya que es preferible el reciclado de papel como materia prima en un proceso sostenible, aunque esta no pueda ser reciclada de forma indefinida. Sin embargo, el bambú sigue siendo una opción viable

para la producción de papel que incluso se está utilizando a nivel industrial para papel tisú.

- b) Las metodologías para la evaluación de calidad de diferentes parámetros del proceso, ya se encuentran establecidos por las normas TAPPI. Se incluyeron puntos de control básicos para el control de la calidad, sin embargo, por la naturaleza artesanal del proceso estos no son tan necesarios ya que se sabe que la calidad del papel no será estándar.
- c) Entre los métodos de blanqueo totalmente libre de cloro, se propuso el blanqueamiento por medio de peróxido de hidrógeno debido a que resultó ser el más positivo entre los tres procesos evaluados con un total de 17 puntos. La propuesta de esta etapa es para una cocción con solución de  $H_2O_2$  al 6% a 115 °C durante 60 minutos con un rendimiento de 86.8%. Este proceso es totalmente compatible con la producción artesanal, ya que es seguro de usar y no produce ningún contaminante al medio ambiente.
- d) Se propuso el pre-diseño del proceso de extracción de la pulpa celulósica a nivel artesanal para producir un lote a la semana de 176 hojas con 160 gsm en una digestión con solución de NaOH al 5% a 150 °C por 1 h, con un rendimiento del 54.20%. También, se propuso junto con equipos básicos que permitan el escalamiento del proceso a futuro como la trituradora Sun Joe CJ602E, olla a presión y cocina común, equipo de refinado a la medida y se omitió equipo como las máquinas de secado para realizar el proceso de secado al aire, esto aumenta el tiempo de producción pero lo hace amigable con el medio ambiente en cuanto al consumo de energía.
- e) Luego de la evaluación del impacto ambiental por el método VIA con un valor global de 6.52 el cual es ALTO, se obtuvo que la contaminación del agua superficial (1, 12, 16, 22, 25, 30, 33, 37 y 41) y la contaminación indirecta del

aire (3, 10, 18, 27 y 32) con VIA de 9.75 y 9.25 respectivamente, se encuentran en la categoría de MUY ALTO por lo que son los principales impactos ambientales negativos que habrá que mitigar en el proceso de extracción de pulpa celulósica a partir del bambú, esto debido al licor negro generado durante el proceso de extracción, así como los lavados de la pulpa, y debido al consumo de energía causando emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Por lo tanto, al poner en marcha el proceso se debe garantizar el tratamiento de efluentes y procurar utilizar energías limpias.

La contaminación de mantos acuíferos subterráneos (2, 13, 17, 23, 26, 31, 34, 38 y 42) y la pérdida de fauna acuática (6, 15, 20, 28, 35 y 39) con VIA de 7.76 y 7.40 respectivamente resultaron con una significancia ALTA, lo que reitera la importancia del tratamiento de efluentes complementada con impermeabilización del suelo para evitar la contaminación proveniente de aguas residuales o posibles derrames de químicos.

En la categoría MEDIA se encuentran la contaminación del suelo (4, 14 y 19), reiterando la necesidad de impermeabilización y gestión de residuos sólidos; pérdida de vegetación (5), debido al consumo de materia prima virgen de bambú para lo cual se debe asegurar que la compra proviene de un cultivo manejado sosteniblemente y el riesgo a la seguridad e higiene ocupacional (7, 8, 11, 21, 24, 29, 36 y 40), para lo cual se debe brindar equipo de protección personal adecuado. Finalmente, los impactos ambientales que recaen en la categoría IV BAJA, aunque siempre es importante monitorearlos, no representarán mucho problema para nuestro caso de estudio.

## Recomendaciones

- a) Dado que solo hay una investigación en la que se especifican los rendimientos del proceso, se recomienda hacer pruebas a nivel de laboratorio para comprobar el rendimiento que se puede obtener y así poder ir escalando el proceso. En cuanto a la materia prima se recomienda hacer pruebas con fibra recuperada para incrementar la sostenibilidad del proceso y verificar la calidad de fibra que se obtiene para determinar el tipo de papel que se puede producir.
  
- b) Aunque la evaluación de calidad es de suma importancia en cualquier proceso, se requiere una inversión extra para hacer pruebas de laboratorio. En un proceso artesanal se recomienda limitar el control de calidad a la selección de culmos y, la verificación del espesor y gramaje de la hoja obtenida para que la persona no incurra en gastos extra al inicio de la puesta en marcha del proceso.
  
- c) Se espera que mientras la tecnología avanza se omita la etapa de blanqueo. Se recomienda limitarse a optimizar el proceso de digestión para siempre estar en la vanguardia de nuevas tecnologías. Mientras tanto, se puede mantener la etapa de blanqueo y dado que es el mismo equipo se puede simplemente utilizar para otro lote de extracción cuando el blanqueo sea omitido.
  
- d) Se recomienda hacer un análisis económico del proceso, ya que aun siendo artesanal para conocer la viabilidad económica del proceso. Tomando en cuenta la posibilidad de escalar el proceso en caso de incremento de la demanda.

- e) Para mitigar los impactos ambientales negativos del proceso y garantizar su sostenibilidad se debe seguir un PMA que contemple principalmente el tratamiento a los efluentes, el uso de energías limpias, impermeabilización el suelo en áreas de almacenamiento de químicos y uso del EPP adecuado según la actividad a realizar.

## OBSERVACIONES

- a) Actualmente, la industria del papel en El Salvador importa la pulpa celulósica, no hay una extracción de pulpa celulósica local por lo que se tiene la oportunidad de incursionar en esta industria empezando de forma artesanal con el papel artístico.
  
- b) La demanda determinada del papel artístico de alto gramaje es baja, ya que sólo se logró contactar a dos academias las cuales subsisten del apoyo del Estado, por lo que la demanda del papel artístico también es variable. Además, inclusive a nivel local se necesitaría un buen plan de negocios para poder competir con empresas internacionales de renombre como lo es Fabriano.
  
- c) Los controles de calidad establecidos por las normas TAPPI requieren reactivos y equipos específicos que no son compatibles con la naturaleza artesanal del proceso. Al final, si el tamaño y el gramaje es lo más importante para el consumidor final el enfoque de control de calidad deberá estar en estos parámetros.
  
- d) El equipo de refinado tuvo que diseñarse debido a que solamente se encontraron equipos a nivel industrial incompatibles con el nivel de producción para el proceso planteado.

## GLOSARIO

### A

Acetilo: grupo funcional, específicamente un radical, el acilo del ácido acético, con fórmula química  $\text{-COCH}_3$ . Algunas veces se abrevia como Ac (no confundir con el elemento químico actinio). El radical acetilo contiene un grupo metilo unido por un enlace simple a un grupo carbonilo.

Aldehído: Molécula orgánica en la que existe el grupo  $\text{-CHO}$ , que resulta de la deshidrogenación u oxidación de un alcohol primario; se nombra añadiendo el sufijo  $\text{-al}$  al hidrocarburo correspondiente.

### B

Bambú: Planta tropical de tallo en forma de caña, alto, leñoso y resistente, hojas grandes y alargadas de color verde claro y flores en panojas derechas, ramosas y extendidas; puede alcanzar hasta 20 m de altura.

### C

Carbohidrato: Sustancia orgánica sólida, blanca y soluble en agua, que constituye las reservas energéticas de las células animales y vegetales; está compuesta por un número determinado de átomos de carbono, un número determinado de átomos de oxígeno y el doble de átomos de hidrógeno.

Carbono: Elemento químico de número atómico 6, masa atómica 12.01 y símbolo C; es un no metal sólido que es el componente fundamental de los compuestos orgánicos y tiene la propiedad de enlazarse con otros átomos de carbono y otras sustancias para formar un número casi infinito de compuestos; en la naturaleza se presenta en tres formas: diamante, grafito y carbono amorfo o carbón; en cada una de estas formas tiene muchas aplicaciones industriales.

**Celobiosa:** Es un disacárido formado por dos glucosas unidas por los grupos hidroxilo del carbono 1 en posición beta de una glucosa y del carbono 4 de la otra glucosa. Por ello este compuesto también se llama  $\beta$ -D-glucopiranosil (1-4)  $\beta$ -D-glucopiranososa.

**Celulosa:** Sustancia sólida, blanca, amorfa, inodora y sin sabor, e insoluble en agua, alcohol y éter, que constituye la membrana celular de muchos hongos y vegetales; se emplea en la fabricación de papel, tejidos, explosivos, barnices, etc.

**Coníferas:** Subdivisión de plantas gimnospermas (árboles y arbustos) de tronco recto, ramas horizontales, de forma cónica, hojas perennes, en forma de escamas o agujas, flores unisexuales y fruto en forma de piña.

**Cloración:** Puede escalarse para adaptarse a la capacidad del sistema. El uso del cloro es también relativamente sencillo, y los sistemas de tratamiento no requieren experiencia técnica extensa.

**Cromóforo:** Parte o conjunto de átomos de una molécula responsable de su color. También se puede definir como una sustancia que tiene electrones capaces de absorber energía y excitarse, a diferentes longitudes de onda.

**Culmos:** Vástagos que emergen de los rizomas, los que alcanzan diferentes alturas y diámetros dependiendo de la especie. Una característica importante es que los culmos del bambú emergen del suelo con su máximo diámetro.

## **E**

**Ésteres:** son compuestos orgánicos derivados de petróleo o inorgánicos oxigenados en los cuales uno o más protones son sustituidos por grupos orgánicos alquilo (simbolizados por R').

Éter: Compuesto químico orgánico, sólido, líquido o gaseoso, en cuya molécula existe un átomo de oxígeno unido a dos radicales de hidrocarburos.

Extracción: Es un procedimiento de separación de una sustancia que puede disolverse en dos disolventes no miscibles entre sí, con distinto grado de solubilidad y que están en contacto a través de una interfaz.

Enzima: Proteína soluble producida por las células del organismo, que favorece y regula las reacciones químicas en los seres vivos.

## **F**

Fenoles: Son compuestos orgánicos aromáticos que contienen el grupo hidroxilo como su grupo funcional. Las concentraciones naturales de compuestos fenólicos son usualmente inferiores a 1 µg/l.

Fibra: Filamento que entra en la composición de tejidos orgánicos animales o vegetales o que presentan en su textura algunos minerales

Floración: Tiempo que duran abiertas las flores de las plantas de una misma especie.

## **H**

Hemicelulosas: son heteropolisacáridos (polisacárido compuesto por más de un tipo de monómero), formado, en este caso un tanto especial, por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces  $\beta$  (1-4).

Hidrólisis: es una reacción química entre una molécula de agua y otra de macromolécula, en la cual la molécula de agua se divide y sus átomos pasan a formar unión de otra especie química.

Hidroxilo: Radical compuesto de un átomo de oxígeno y uno de hidrógeno, que se encuentra presente en los hidróxidos y en las disoluciones acuosas básicas.

Hojas: Órgano de las plantas que crece en las ramas o en el tallo, generalmente de color verde, ligera, plana y delgada, y que puede tener diversas formas; en este órgano se realizan principalmente las funciones de transpiración y fotosíntesis.

## **L**

Latifoliadas: Árboles con un tronco con una ramificación desordenada, sus hojas son anchas y pueden ser perennes o caedizas

Lignina: Sustancia natural que forma parte de la pared celular de muchas células vegetales, a las cuales da dureza y resistencia.

Lignocelulosa: combinación de lignina y celulosa que fortalece las células de determinadas especies vegetales, en especial las forestales.

## **O**

Oxígeno: Elemento químico de número atómico 8, masa atómica 15.99 y símbolo O; es un gas incoloro e inodoro que se encuentra en el aire, en el agua, en los seres vivos y en la mayor parte de los compuestos orgánicos e inorgánicos.

## **P**

Pasta: es el material hecho a base de madera más utilizado para la fabricación de papel. Las maderas utilizadas para este fin son conocidas como maderas pulpables.

Pectina: Sustancia neutra que se encuentra en muchos tejidos vegetales y que se emplea en alimentación para dar consistencia a la mermelada y a la gelatina

**Polisacárido:** Hidrato de carbono formado mediante la unión de varias moléculas de azúcar, como el almidón o la celulosa, que tienen una función estructural o energética (de reserva de glucosa).

**Pulpaje:** se utilizan químicos que disuelven la mayor cantidad de lignina y la menor cantidad de celulosa posible. El proceso con sulfato utiliza licor blanco; una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na<sub>2</sub>S). El hidróxido de sodio degrada la lignina y el sulfuro de sodio acelera las reacciones de cocción y decrece la degradación de la celulosa causada por el hidróxido de sodio.

## **R**

**Rama:** Parte de ciertas plantas que crece a partir del tallo o del tronco y en la que, generalmente, brotan las hojas, las flores y los frutos.

**Raíz:** Es el único órgano no segmentado que presenta el bambú, éstas son cilíndricas, delgadas y no crecen en diámetro. Su número depende del tipo de suelo, edad y tamaño de la planta.

**Rizoma:** Son órganos de gran importancia destinados a la propagación y al almacenamiento de nutrientes, además de servir de sostén mecánico para la porción aérea de la planta.

## **S**

**Semilla:** Grano contenido en el interior del fruto de una planta y que, puesto en las condiciones adecuadas, germina y da origen a una nueva planta de la misma especie.

**Sodio:** Elemento químico de número atómico 11, masa atómica 22.99 y símbolo Na; es un metal alcalino de color blanco plateado, blando, ligero y explosivo al contacto con el agua que se encuentra muy abundantemente en la naturaleza, siempre

combinado formando sales, y se usa en células fotoeléctricas, lámparas y en síntesis de productos químicos.

## **T**

TAPPI: Technical Association of the Pulp & Paper Industry

Tazones: Recipiente semiesférico, parecido a una taza, pero de mayor tamaño y sin asa, que se usa para tomar ciertas bebidas y alimentos líquidos.

Tensión: magnitud física que representa la fuerza por unidad de área en el entorno de un punto material sobre una superficie real o imaginaria de un medio continuo.

## **U**

Urónico: Derivado de un monosacárido por oxidación en el carbono 6, mediante la conversión de un alcohol primario en un carboxilo.

## **X**

Xilano: es un polisacárido constituido por una cadena lineal de residuos de xilosa y diversas ramificaciones y sustituciones. El xilano es el polisacárido más abundante después de la celulosa. La corteza de los árboles y la paja contienen hasta 30% de xilano, la madera de coníferas 7-12% y la de árboles de hojas caducas 20-25%.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ACCE. (2020). Priorización de productos. Agencia de Compras y Contrataciones del Estado. Uruguay. Recuperado el 16 de abril de 2020, de <https://bit.ly/35cUxPs>
2. Anastas, P. T., y Zimmerman, J. B. (2003). Design through the Twelve Principles of Green Engineering. Estados Unidos de América. Recuperado el 22 de julio de 2020, de American Chemistry Society. doi:<https://doi.org/10.1021/es032373g>
3. Andries, M. D., Herrero-Jaurégui, C., y Acosta-Gallo, B. (2018). Manual de reforestación de especies de uso múltiple. El caso del bambú en el bajo Lempa (El Salvador). El Salvador. Recuperado el 8 de octubre de 2020, de <https://bit.ly/2H9sPtf>
4. Añazco, M. (2013). Estudio de vulnerabilidad del bambú (*Guadua angustifolia*) al cambio climático en la costa del Ecuador y norte Perú. Ecuador. Recuperado el 24 de octubre, 2020, de <https://bit.ly/34ANCzf>
5. Ardila, C., M.B., F., y Fernández, F. (2020). Oxidative pyrolysis of *Guadua angustifolia* Kunth. Portugal. Recuperado el 25 de julio de 2020, de Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.057>
6. Ardón Aguilar, S. R., Chicas Sorto, M. Á., y Dimas Renderos, N. F. (2017). Modelo de empresa de productos diversificados elaborados a base de bambú para las cooperativas de FEDECOOPADES. El Salvador. Recuperado el 20 de febrero de 2020, de <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/13954/>
7. Area, M. C., y Valade, J. L. (1996). Hacia una utilización integral de la madera. España. Recuperado el 13 de enero de <https://bit.ly/2Mzemtb>
8. Asamblea Legislativa de la República de El Salvador. (2017). Ley de Medio Ambiente. El Salvador. Recuperado el 24 de agosto de 2021 de <https://bit.ly/300vAGy>

9. Bajpai, P. (2012). *Environmentally Benign Approaches for Pulp Bleaching || ECF and TCF Bleaching*. India. Recuperado el 8 de agosto de 2020 de Elsevier. doi:10.1016/b978-0-444-59421-1.00011-9
10. Bajpai, P. (2015). *Green Chemistry and Sustainability in Pulp and Paper Industry*. Patiala, India. Recuperado el 13 de agosto de 2020 de Springer, Cham. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-18744-0>
11. Bajpai, P. (2018). *Pulping Fundamentals. Biermann's Handbook of Pulp and Paper*. India. Recuperado el 13 de agosto de 2020 de Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814240-0.00012-4>
12. Bermúdez Alvite, J. D., Touza Vázquez, M. C., y Sanz Infante, F. (2002). *Manual de la madera de eucalipto blanco*. España. Recuperado el 17 de diciembre de 2020 de <https://bit.ly/36sj438>
13. Césare, M. F., Hilario, F., Callupe, N., Cruz, L., Calle, J. L., y Gonzales, H. E. (2019). *Caracterización química y física del bambú*. Perú. Recuperado el 20 de octubre de 2020 de <https://bit.ly/34m8bPz>
14. CESCE. (2019). *Informe sectorial de la economía española 2019*. Compañía Española de Seguros de Crédito a la Exportación. España. Recuperado el 13 de febrero de 2020, de <https://bit.ly/2Oyy5Hi>
15. Chiluiza Benítez, C. I., y Hernández Lara, J. P. (2009). *Elaboración de papel artesanal de caña guadua (Guadua angustifolia K)*. Ecuador. Recuperado el 13 de julio de 2020 de <https://bit.ly/2l2CtPb>
16. Clark, L. (2006). *Bamboo Biodiversity*. Estados Unidos de América. Recuperado el 21 de agosto de 2020 de <https://bit.ly/2Fw7Q3a>
17. Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo. (1987). *Nuestro futuro común*. Noruega. Recuperado el 8 de agosto de 2020, de <https://bit.ly/39ztm1A>
18. Cuéllar, A., y Muñoz, I. (2009). *Fibra de guadua como refuerzo de matrices poliméricas*. Colombia. Recuperado el 20 de octubre de 2020 de <https://bit.ly/2Tiki9k>

19. EPA. (2016). Paper Making and Recycling. Environmental Protection Agency. Estados Unidos de América. Recuperado el 25 de julio de 2020 de <https://bit.ly/38kN7v5>
20. Estrada, M. (2010). *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. Colombia. Recuperado el 8 de agosto de 2020 de ResearchGate. doi:10.13140/RG.2.1.3984.3046
21. FAO. (1995). *Impacto Ambiental de las Prácticas de Cosecha Forestal y Construcción de Caminos en Bosques Nativos Siempreverdes de la X Región de Chile*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Italia. . Recuperado el 20 de febrero de 2020 de <https://bit.ly/3AawGw9>
22. FAO. (2007). World bamboo resources. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Italia. Recuperado el 11 de abril de 2020, de <http://www.fao.org/3/a-a1243e.pdf>
23. FAO. (2010). Global forest resource assesment 2010: Main report. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Italia. Recuperado el 13 de octubre de 2020 de <http://www.fao.org/3/a-i1757e.pdf>
24. FAO. (2020). Evaluación de los recursos forestales mundiales. Informe El Salvador. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Italia. Recuperado el 22 de septiembre de 2020, de <https://bit.ly/3dj5iSC>
25. FAO. (2020). Global forest resource assesment 2020: Main report. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Italia. Recuperado el 11 de abril de 2020, de FAO doi:<https://doi.org/10.4060/ca9825en>
26. Fedkin, M. (2020). Sustainability Definitions. Estados Unidos de América. Recuperado el 3 de septiembre de 2020, de John A. Dutton e-Education Institute: <https://www.e-education.psu.edu/eme807/node/575>

27. Fernandez, E. C., Palijon, A. M., Liese, W., y Esguerra, F. L. (2003). *Silviculture and management of newly established bamboo plantation*. Québec, Canadá. Recuperado el 11 de septiembre de 2020, de <http://www.fao.org/3/XII/0078-B4.htm>
28. Gómez Cívicos, J. I. (2008). Ingeniería Verde: Doce principios para la Sostenibilidad, Ingeniería Química. Estados Unidos de América. Recuperado el 21 de Julio de 2020, de <https://bit.ly/2QXvgRi>
29. Gonzales Mora, H. E. (2003). Recursos fibrosos de plantas no madereras para la industria papelera. Perú. Recuperado el 7 de octubre de 2020, de <https://bit.ly/38kjCda>
30. González Yebra, Ó. (2014). Caracterización del bambú *Guadua (Guadua angustifolia)* para el diseño e industrialización en España. España. Recuperado el 7 de octubre de 2020, de <https://bit.ly/2U0Uvtv>
31. Govardhan, S. (2013). Memorial a F.A. McClure. Puerto Rico. Recuperado el 13 de octubre de 2020, de <https://bit.ly/3JI4bm>
32. Greenpeace. (2006). El futuro de la producción de celulosa y las técnicas de producción más favorables para el medio ambiente. Argentina. Recuperado el 22 de julio de 2020, de <https://bit.ly/3hl0g9p>
33. Hebel, D. E., Heisel, F., Javadian, A., Wielopolski, M., y Schlesier, K. (2015). *Constructing Bamboo - Introducing an alternative for the construction industry*. Singapur. Recuperado el 12 de julio de 2021, de ETH Singapore. doi:<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010636880>
34. Hoballah, A., y Averous, S. (2015). Objetivo 12—Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles: un requisito esencial para el desarrollo sostenible. New York, Estados Unidos de América. Recuperado el 21 de agosto de 2020, de <https://bit.ly/32c2ZM1>
35. Huberman, M. A. (1959). La silvicultura del bambú. Italia. Recuperado el 17 de junio de 2020, de <http://www.fao.org/3/x5390s/x5390s05.htm>

36. INBAR. (2019). *Bamboo in the Circular Economy. The potential of bamboo in a zero-waste, low carbon future. International bamboo and rattan organization*. China. Recuperado el 12 de Septiembre de 2020, de <https://bit.ly/37bItiO>
37. INBAR. (2019). Trade overview 2017. Bamboo and Rattan Commodities in the International Market. International Bamboo and Rattan Organisation. China. Recuperado el 28 de octubre de 2020, de <https://bit.ly/3pcwEPU>
38. International Development Research Centre y la International Union of Forestry Research Organizations. (1980). *Bamboo Research in China*. Canadá. Recuperado el 11 de Febrero de 2020, de <https://bit.ly/3hVe6zk>
39. ITA. (2019). *El Salvador - Packaging Equipment. International Trade Administration*. Estados Unidos de América. Recuperado el 12 de julio de 2020 de <https://bit.ly/3n0h7kd>
40. Laftah, W. A., y Abdul Rahman, W. A. (2016). Pulping Process and the Potential of Using Non-Wood Pineapple Leaves Fiber for Pulp and Paper Production: A Review. Malasia. Recuperado el 15 de agosto de 2020, de *Journal of Natural Fibers*.  
doi: <http://dx.doi.org/10.1080/15440478.2014.984060>
41. Londoño, X. (1995). A Decade of Observations of a *Guadua angustifolia* Plantation in Colombia. Colombia. Recuperado el 20 de Abril de 2020, de <https://bit.ly/2EPrwPp>
42. Londoño, X. (2001). Evaluation of bamboo resources in Latin America. Colombia. Recuperado el 21 de Marzo de 2020, de <https://bit.ly/2FruVUP>
43. Londoño, X., Gloria, C. C., Riaño, N. M., y López, Y. (2002). Caracterización de la anatomía de los culmos de la *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae). Colombia. Recuperado el 12 de octubre de 2020, de [https://bamboo.org/\\_uploads/pdfs/BSCv16\\_2002.pdf](https://bamboo.org/_uploads/pdfs/BSCv16_2002.pdf)
44. López Sardi, E. M. (2007). Fabricación de pasta de celulosa. Aspectos técnicos y contaminación ambiental. Argentina. Recuperado el 16 de julio de 2020, de <https://bit.ly/2U1zjNU>

45. MAG. (2015). MAG participa en “Primer Foro Nacional del Bambú”. Ministerio de Agricultura y Ganadería. El Salvador. Recuperado el 23 de septiembre de 2020, de <https://bit.ly/31h5xZJ>
46. MAG. (2019). Boletín Informativo DGFCR. Ministerio de Agricultura y Ganadería. División de recursos forestales. El Salvador. Recuperado el 2 de Octubre de 2020, de <https://bit.ly/2FwrwnK>
47. Mamaye, M., Kiflie, Z., Feleke, S., y Yimam, A. (2020). *Evaluation of Soda Delignification and Single-Stage Hydrogen Peroxide Bleaching for the Ethiopian Sugarcane Bagasse for Paper Production*. Etiopía. Recuperado el 2 de julio de 2021, de Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/s12355-019-00793-y>
48. MARN. (2021). Clima en El Salvador. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. El Salvador. Recuperado el 8 de septiembre de 2021, de <https://www.snet.gob.sv/ver/meteorologia/clima+en+el+salvador/>
49. Martínez Yepes, P. N., Rodríguez Espinosa, J. A., y Díaz Toro, P. C. (2011). Obtención de vainillina a partir de la lignina de la Guadua. Colombia. Scientia Et Technica. Recuperado el 18 de julio de 2021, de doi: <https://doi.org/10.22517/23447214.1319>
50. Martínez, J., Vaca, D., Orozco, M., Montero, A., y Carrión, D. (2015). *Aplicación de métodos multicriterio para la selección de materiales para menaje de cocinas de inducción*. Ecuador. Recuperado el 18 de julio de 2021, de Operador Nacional de Electricidad (CENACE). doi:10.37116/revistaenergia.v11.n1.2015.79
51. Maxwell, A., y MacLeod, N. (2014). The Future of Bamboo in Panama: An Ecological and Community-Based Approach. Panamá. Recuperado el 7 de octubre de 2020, de <https://bit.ly/3odYsme>
52. Ministerio de Hacienda de Costa Rica. (2011). Compras Públicas Sustentables. Costa Rica. Recuperado el 20 de Julio de 2020, de <https://bit.ly/31ZJyXH>

53. Ministerio de Medio Ambiente de Chile. (2014). Manual para las compras públicas con énfasis en el análisis costo-beneficio. Chile. Recuperado el 20 de Julio de 2020, de <https://bit.ly/3i0L0Pi>
54. MINTIC y MINEDUCACIÓN. (2020). Desarrollo Sostenible. Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones y Ministerio de Educación. Colombia. Recuperado el 19 de noviembre de 2021, de <https://bit.ly/2Lauz7u>
55. PNUD. (2020). Objetivo 12: Producción y consumo responsable. Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. Estados Unidos de América. Recuperado el 10 de agosto de 2020, de <https://bit.ly/3kjaR6r>
56. Popp, D., Hafner, T., y Johnstone, N. (2011, Mayo 11). Environmental policy vs. public pressure: Innovation and diffusion of alternative bleaching technologies in the pulp industry. Estados Unidos de América. Recuperado el 18 de marzo de 2021, de ELSEVIER.  
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.05.018>
57. Pöyry Management Consulting. (2018). World Fibre Outlook up to 2030 market report. Finlandia. Recuperado el 16 de julio de 2020, de <https://bit.ly/30fRMc9>
58. Prinsen, P. (2010). Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. España. Recuperado el 18 de octubre de 2020, de <http://hdl.handle.net/10261/66265>
59. Qin, C., Yao, S., y Wang, S. (2016). *Bleaching process and its mechanism for bamboo chemi-mechanical pulp*. China. Recuperado el 10 de julio de 2021, de Science and Technology Review. doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.19.012
60. Ribeiro Viotti, M. L. (2012). A 10-year framework of programmes on sustainable consumption. Brazil. Recuperado el 3 de Julio de 2020, de <https://bit.ly/2QVcQAB>

61. Rolón, J., Federico, M. C., Rodríguez, M. E., Tucci, V., y Rodríguez, M. A. (2016). Análisis de los costos de producción de pulpa de celulosa: métodos kraft y mecánico. Argentina. Recuperado el 13 de septiembre de 2021, de <https://bit.ly/3pwMOpB>
62. Sannazzaro, J. (2011). Controversias científico-públicas. El caso del conflicto por las "papeleras" entre Argentina y Uruguay y la participación ciudadana. Argentina. Recuperado el 4 de junio de 2020, de <https://bit.ly/2Ep202Q>
63. Santos Meneses, T. M. (2018). Autohidrólisis y deslignificación organosoluble de madera de *Pinus radiata* para la recuperación de hemicelulosas y lignina con aprovechamiento de la fracción celulósica por vía enzimática. España. Recuperado el 15 de octubre de 2020, de <https://eprints.ucm.es/49065/1/T40168.pdf>
64. Schröder, S. (2014). *Guadua angustifolia*. Colombia. Recuperado el 7 de octubre de 2020, de <https://bit.ly/3kfm2wC>
65. Sixta, H. (2006). *Handbook of Pulp*. Estados Unidos de América. Recuperado el 2 de febrero de 2021, de Wiley. doi:DOI:10.1002/9783527619887
66. Somen, C. K., Seethalakshmi, K. K., Unni, K. K., y Raveendran, V. P. (2011). *Planting stock production of selected commercial species of bamboos*. India. Recuperado el 19 de octubre de 2020, de <http://docs.kfri.res.in/KFRI-RR/KFRI-RR391.pdf>
67. Suess, H. U. (2010). Pulp bleaching today. Alemania. Recuperado el 3 de febrero de 2021, de <https://bit.ly/3cbryO9>
68. TAPPI. (1999). Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp, Test Method T 203 cm-09. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Estados Unidos de América. Recuperado el 3 de junio de 2020, de <https://bit.ly/2Yz5R7W>
69. TAPPI. (1999). Analysis of soda and sulfate black liquor, Test Method T 625 cm-14. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Estados Unidos de América. Recuperado el 3 de junio de 2020, de <https://bit.ly/3wqDd5m>

70. TAPPI. (1999). Determination of equilibrium moisture in pulp, paper and paperboard for chemical analysis, Test Method TAPPI/ANSI T 550 om-13. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Estados Unidos de América. Recuperado el 3 de junio de 2020, de <https://bit.ly/3bRyaRW>
71. TAPPI. (1999). Kappa number of pulp TAPPI/ANSI T 236 om-13. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Estados Unidos de América. Recuperado el 3 de junio de 2020, de <https://bit.ly/3oaUSub>
72. TAPPI. (2006). Bleaching 101: The Basics. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Estados Unidos de América. Recuperado el 1 de septiembre de 2021, de <https://www.tappi.org/content/pdf/journal/06julff.pdf>
73. The One Planet Network. (2020). Sustainable Public Procurement. Estados Unidos. Recuperado el 2021 de Julio de 2020, de <https://bit.ly/3llp4KW>
74. Toro Sánchez, F. J. (2007). El desarrollo sostenible: un concepto de interés para la geografía. España. Recuperado el 8 de agosto de 2020, de <https://www.redalyc.org/pdf/171/17104008.pdf>
75. Torres, D., Duque, J., Peña, P., y Ramírez, Á. (2013). *Compilacion de inventario de ciclo de vida para la produccion de caña guadua (guadua angustifolia kunth)*. Ecuador. Recuperado el 7 de septiembre de 2020, de <https://bit.ly/3k6vLFG>
76. Universidad de British Columbia. (2013). Consistency and Freeness. Canada. Recuperado el 11 de septiembre de 2021 de <https://bit.ly/3pzxgl5>
77. Widmer, Y. (1990). Situación del bambú en América Latina, con énfasis en América Central y Costa Rica. Suiza. Recuperado el 8 de Agosto de 2020, de <https://bit.ly/33VwpzZ>
78. WWF. (2012). Living Forest Report. World Wide Fund for Nature. Estados Unidos de América. Recuperado el 14 de Febrero de 2020, de <https://bit.ly/31Q7jl8>
79. Yacelda Perugachi, J. G. (2018). Obtención de base de celulosa a partir de bambú para utilizarla como materia prima en la fabricación de fibra textil. Ecuador. Recuperado el 17 de diciembre de 2020, de <https://bit.ly/3cpqZBY>

## ANEXOS

Anexo 1. Composición lignocelulósica de otras fuentes de biomasa utilizadas para la extracción de pulpa celulósica para la producción de papel.....	154
Anexo 2. Cálculos de los balances de materia para el proceso de extracción de pulpa celulósica para la producción de papel de bambú .....	155
Anexo 3. Cálculos para la evaluación de impactos ambientales del pre-diseño del proceso de extracción de pulpa celulósica para la producción de papel de bambú.....	167
Anexo 4. Estimación de la demanda de papel artístico.....	167
Anexo 5. Diseño de refinadora.....	169

**Anexo 1. Composición lignocelulósica de otras fuentes de biomasa utilizadas para la extracción de pulpa celulósica para la producción de papel**

<b>Especie</b>	<b>Celulosa (%)</b>	<b>Hemicelulosa (%)</b>	<b>Lignina (%)</b>	<b>Extractos (%)</b>	<b>Fuente</b>
<b>Maderas duras</b>					
<b>Betula verrucosa</b>	41.0	32.4	22.0	3.2	(Santos Meneses, 2018)
<b>Eucalyptus globulus</b>	51.0	35.2	21.9	1.3	(Santos Meneses, 2018)
<b>Fagus sylvatica</b>	39.4	33.3	24.8	1.2	(Santos Meneses, 2018)
<b>Maderas blandas</b>					
<b>Abies balsamea</b>	38.8	28.5	29.1	2.7	(Santos Meneses, 2018)
<b>Picea abies</b>	41.7	28.3	27.4	1.7	(Santos Meneses, 2018)
<b>Pinus sylveris</b>	40.0	28.5	27.7	3.5	(Santos Meneses, 2018)
<b>Otras</b>					
<b>Bagazo de caña de azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)</b>	39.01		23.09	3.78	(Prinsen, 2010)
<b>Rastrojo de maíz</b>	37.69		18.59	5.61	(Prinsen, 2010)
<b>Paja de trigo</b>	32.64		16.85	12.95	(Prinsen, 2010)
<b>Pinus radiata</b>	41.7		25.9	2.7	(Prinsen, 2010)
<b>Alamo híbrido</b>	39.23		25.18	6.89	(Prinsen, 2010)
<b>Eucalyptus</b>	48.07		26.91	4.15	(Prinsen, 2010)
<b>Alamo (<i>Panicum virgatumis</i>)</b>	30.97		17.56	16.99	(Prinsen, 2010)
<b>Sorgo dulce (<i>Sorghum bicolor</i>)</b>	34.01		16.09	22.03	(Prinsen, 2010)

## Anexo 2. Cálculos de los balances de materia para el proceso de extracción de pulpa celulósica para la producción de papel de bambú

### a) Trituración

Calculando el valor de C, la recirculación.

$$A' = A + C \text{ (ECUACIÓN 5.1)}$$

La recirculación en el tamizado es del 9% con pérdidas del 1%

$$C = 0.09A'' \text{ (Ecuación 5.2)}$$

En la trituración, el 99% cumple con el tamaño adecuado.

$$A'' = 0.99A' \text{ (Ecuación 5.3)}$$

Sustituyendo la ecuación 5.2 y 5.3 en la ecuación 5.1 se tiene:

$$A' = A + 0.09 * 0.99A'$$

$$A' - 0.09 * 0.99A' = A$$

$$0.9109A' = A$$

$$A' = \frac{A}{0.9109}$$

$$A' = \frac{10}{0.9109}$$

$$A' = 10.9781 \text{ Kg de astillas secas}$$

Se tiene que de lo triturado se obtiene el 99% y lo demás es pérdida, sustituyendo en la ecuación se tiene:

$$A'' = 0.99 * 10.9781 \text{ Kg de astillas secas (Ecuación 11.1)}$$

$$A'' = 10.8683 \text{ Kg de astillas secas trituradas}$$

$$P_1 = 0.01 * A'$$

$$P_1 = 0.01 * 10.9781 \text{ Kg de astillas secas}$$

$$P_1 = 0.1098 \text{ Kg de astillas secas perdidas en la trituración}$$

### **b) Tamizado**

Del tamizado se obtiene el 90% del producto

$$B = 0.90 * A''$$

$$B = 0.90 * 10.8684 \text{ Kg de astillas secas}$$

$$B = 9.7815 \text{ Kg de astillas secas tamizadas}$$

$$P_2 = 0.01 * A''$$

$$P_2 = 0.01 * 10.8684 \text{ Kg de astillas secas}$$

$$P_2 = 0.1087 \text{ Kg de astillas secas perdidas}$$

$$C = 0.09A''$$

$$C = 0.09 * 10.8683 \text{ Kg de astillas secas trituradas}$$

$$C = 0.9781 \text{ Kg de astillas recirculadas}$$

### **c) Humectación**

Entran las astillas secas tamizadas y 10 Litros de agua por kg de astillas secas.

$\rho_{agua} = 996.31 \text{ Kg/m}^3$  a  $28^\circ\text{C}$  , temperatura en planicies internas de 0 a 800 m sobre el nivel del mar en El Salvador (MARN, 2021).

$$\rho_{agua} = 996.31 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0.99631 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$D = 10 * B * \rho_{\text{agua}} = 10 * 9.7815 \text{ Kg de astillas secas tamizadas} * 0.99631 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$D = 97.4541 \text{ Kg de agua}$$

$$E = B + D$$

$$E = 9.7815 \text{ Kg de astillas secas tamizadas} + 97.4541 \text{ Kg de agua}$$

$$E = 107.2356 \text{ Kg de astillas humectadas}$$

#### **d) Escurrido**

En esta etapa escurre el 97% del agua más el 1% de impurezas en las astillas.

$$F = 0.01 * B + 0.97 * D$$

$$F = 0.01 * 9.7815 \text{ Kg de astillas secas tamizadas} + 0.97 * 97.4541 \text{ Kg de agua}$$

$$F = 0.0978 \text{ Kg de impurezas} + 94.5305 \text{ Kg de agua escurrida}$$

$$F = 94.6283 \text{ Kg de agua con impurezas}$$

$$G = 0.99 * B + 0.03 * D$$

$$G = 0.99 * B + 0.03 * D$$

$$G = 0.99 * 9.7815 \text{ Kg de astillas secas tamizadas} + 0.03 * 97.4541 \text{ Kg de agua}$$

$$G = 9.6837 \text{ Kg de astillas secas tamizadas} + 2.9236 \text{ Kg de agua}$$

$$G = 12.6073 \text{ Kg de astillas humectadas}$$

#### **e) Digestión**

En esta etapa se añade a las astillas humectadas la solución de NaOH al 3% en relación 1:10 kg de guadua, se obtiene la pulpa de bambú con un rendimiento del 54.20% y se obtiene el 80% de licor gastado.

Calculando la densidad de la solución de NaOH:

$$\text{Masa de NaOH} = 5 \text{ kg}$$

Litros de agua = 100 L

$$\text{Masa de agua} = 100L * \rho_{\text{agua}} = 100L * 0.99631 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$\text{Masa de agua} = 100L * 0.99631 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$\text{Masa de agua} = 99.631 \text{ Kg de agua}$$

$$\rho_{\text{sln NaOH } 5\%} = \frac{\text{Masa de agua} + \text{masa de NaOH}}{\text{L de solución}}$$

$$\rho_{\text{sln NaOH } 5\%} = \frac{99.631 \text{ Kg de agua} + 5 \text{ kg de NaOH}}{100 \text{ L de solución}}$$

$$\rho_{\text{sln NaOH } 5\%} = 1.04631 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

Calculando la cantidad de solución de NaOH a agregar:

$$H = 10 * 9.6837 \text{ Kg de astillas secas tamizadas} * \rho_{\text{sln NaOH } 5\%}$$

$$H = 96.8380 \text{ L de solución de NaOH} * 1.04631 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$H = 101.3215 \text{ kg de solución de NaOH}$$

Calculando la cantidad de licor negro que sale:

$$I = (G + H) * 0.8$$

$$I = (12.6073 \text{ Kg de astillas humectadas} + 101.3215 \text{ kg de solución de NaOH}) * 0.8$$

$$I = 91.1430 \text{ Kg de licor gastado}$$

Calculando la cantidad de pulpa de bambú obtenida:

$$J = G + H - I$$

$$J = 12.6073 \text{ Kg de astillas humectadas} + 101.3215 \text{ kg de solución de NaOH} \\ - 91.1430 \text{ Kg de licor gastado}$$

$$J = 22.7858 \text{ kg de pulpa de bambú}$$

$$\text{masa de bambú seca en pulpa} = 0.5420 * 9.6837 \text{ Kg de astillas escurridas}$$

$$\text{masa de bambú seca en pulpa} = 5.2486 \text{ kg}$$

### f) Lavado 1

En esta etapa se lava la pulpa con agua a una relación de 4:1 kg de pulpa y se deja a una consistencia del 10% para la etapa de blanqueo con pérdidas del 1%.

Calculando el agua a agregar:

$$K = 4 * J * \rho_{agua}$$

$$K = 4 * 22.7858 \text{ kg de pulpa de bambú humectada} * 0.99631 \frac{Kg}{L}$$

$$K = 90.8069 \text{ Kg de agua}$$

Calculando la masa de la pulpa luego del lavado:

$$M = \text{masa de bambú en la pulpa lavada} + \text{masa de agua}$$

Calculando la masa de bambú en la pulpa:

$$\text{masa de bambú en la pulpa lavada} = 0.99 * 5.2486 \text{ kg en la pulpa}$$

$$\text{masa de bambú en la pulpa lavada} = 5.1961 \text{ kg}$$

Calculando la masa de agua:

$$\%Consistencia (Cs) = \frac{\text{Masa de la pulpa seca}}{\text{Masa de la pulpa húmeda}} * 100$$

$$\%Cs = \frac{\text{Masa de la pulpa seca}}{\text{Masa de la pulpa húmeda}} * 100$$

$$\%Cs = \frac{\text{Masa de la pulpa seca}}{\text{Masa de la pulpa seca} + \text{Masa de agua}} * 100$$

$$Cs = \frac{\text{Masa de la pulpa seca}}{\text{Masa de la pulpa seca} + \text{Masa de agua}}$$

$$Cs(\text{Masa de la pulpa seca} + \text{Masa de agua}) = \text{Masa de la pulpa seca}$$

$$Cs * \text{Masa de la pulpa seca} + Cs * \text{Masa de agua} = \text{Masa de la pulpa seca}$$

$$Cs * \text{Masa de agua} = \text{Masa de la pulpa seca} - Cs * \text{Masa de la pulpa seca}$$

$$\text{Masa de agua} = \frac{\text{Masa de la pulpa seca} - C_s * \text{Masa de la pulpa seca}}{C_s}$$

$$\text{Masa de agua} = \frac{\text{Masa de la pulpa seca} - 0.1 * \text{Masa de la pulpa seca}}{0.1}$$

$$\text{Masa de agua} = \frac{0.9 * \text{Masa de la pulpa seca}}{0.1}$$

$$\text{Masa de agua} = \frac{0.9 * 5.1961 \text{ kg}}{0.1}$$

$$\text{Masa de agua} = 46.7649 \text{ kg}$$

Por lo tanto

$$M = 5.1961 \text{ kg} + 46.7649 \text{ kg}$$

$$M = 51.9610 \text{ kg de pulpa lavada}$$

Calculando la masa del licor gastado:

$$L = J + K - M$$

$$L = 22.7860 \text{ kg de pulpa de bambú} + 90.8076 \text{ Kg de agua} - 51.9610 \text{ kg de pulpa lavada}$$

$$L = 61.6326 \text{ Kg de licor gastado}$$

### g) Blanqueo

Calculando la masa de la solución de  $H_2O_2$  al 6%:

De la hoja de seguridad se tiene que  $\rho_r = 1.02$

$$\rho_r = \frac{\rho_{\text{soln } H_2O_2}}{\rho_{H_2O}}$$

$$\rho_{\text{soln } H_2O_2} = \rho_r * \rho_{H_2O}$$

$$\rho_{\text{soln } H_2O_2} = 1.02 * 0.99631 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$\rho_{\text{soln } H_2O_2} = 1.0162 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$O = 10 * \text{masa de la pulpa seca} * \rho_{\text{soln } H_2O_2}$$

$$O = 10L * 5.1961 * 1.0162 \frac{Kg}{L}$$

$$O = 52.8028 \text{ Kg de solución de } H_2O_2 \text{ al 6\%}$$

Calculando la masa seca de la pulpa blanqueada:

$$\text{Masa de pulpa seca blanqueada} = 0.868 * \text{masa de la pulpa seca lavada}$$

$$\text{Masa de pulpa seca blanqueada} = 0.868 * 5.1961 \text{ kg de pulpa seca}$$

$$\text{Masa de pulpa seca blanqueada} = 4.5102 \text{ kg}$$

Calculando el agua en la pulpa:

$$\text{Masa de agua} = \frac{0.85 * \text{Masa de la pulpa seca blanqueada}}{0.15}$$

$$\text{Masa de agua} = \frac{0.85 * 4.5102 \text{ kg de pulpa seca blanqueada}}{0.15}$$

$$\text{Masa de agua} = 25.5578 \text{ kg}$$

Por lo tanto:

$$P = \text{Masa de pulpa seca blanqueada} + \text{Masa de agua}$$

$$P = 4.5102 \text{ kg de pulpa seca blanqueada} + 25.5578 \text{ kg de agua}$$

$$P = 30.0680 \text{ kg de pulpa blanqueada}$$

Calculando la masa del licor gastado en el blanqueo:

$$N = M + O - P$$

$$N = 51.9610 \text{ kg de pulpa lavada} + 52.8028 \text{ Kg de solución de } H_2O_2 \text{ al 6\%} \\ - 30.0680 \text{ kg de pulpa blanqueada}$$

$$N = 74.6958 \text{ kg de licor gastado en el blanqueo}$$

### **h) Lavado 2**

Calculando el agua a agregar:

$$Q = 4 * P * \rho_{H_2O}$$

$$Q = 4 * 30.0680 \text{ kg de pulpa blanqueada} * 0.99631 \frac{Kg}{L}$$

$$Q = 119.8282 \text{ kg de agua}$$

Calculando la pérdida de masa en el licor negro:

$$\text{Perdidas} = 4.5102 \text{ kg de pulpa seca blanqueada} * 0.01$$

$$\text{Perdidas} = 0.0451 \text{ kg de pulpa en el licor}$$

Por lo tanto, la masa seca del lavado 2:

*Masa seca del lavado 2*

$$= 4.5102 \text{ kg de pulpa seca blanqueada} - 0.0451 \text{ kg de pulpa en el licor}$$

$$\text{Masa seca del lavado 2} = 4.4651 \text{ kg}$$

Calculando el agua en la pulpa al 25%:

$$\text{Masa de agua en pulpa} = \frac{0.75 * \text{Masa seca del lavado 2}}{0.25}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa} = \frac{0.75 * 4.4651 \text{ kg de masa seca del lavado 2}}{0.25}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa} = 13.3953 \text{ kg}$$

Por lo tanto, la pulpa lavada a la salida:

$$S = 4.4651 \text{ kg masa seca} + 13.3953 \text{ kg de agua en pulpa}$$

$$S = 17.8604 \text{ kg de pulpa}$$

Calculando el licor gastado:

$$R = P + Q - S$$

$$R = 30.0680 \text{ kg de pulpa blanqueada} + 119.8284 \text{ kg de agua} - 17.8604 \text{ kg de pulpa lavada}$$

$$R = 132.0360 \text{ kg de licor gastado}$$

### i) Batido

$$S = 17.8604 \text{ kg de pulpa}$$

$$\text{Pérdida en el licor} = 4.4651 \text{ kg de pulpa seca} * 0.03$$

$$\text{Pérdida en el licor} = 0.1339 \text{ kg de pulpa seca perdida}$$

$$\text{Masa que sale del batido} = 4.4651 \text{ kg de pulpa seca} - 0.1339 \text{ kg de pulpa seca perdida}$$

$$\text{Masa que sale del batido} = 4.3312 \text{ kg de pulpa seca}$$

Calculando el agua en la pulpa al 25%:

$$\text{Masa de agua en pulpa} = \frac{0.75 * \text{Masa seca que sale del batido}}{0.25}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa final} = \frac{0.75 * 4.3312 \text{ kg de pulpa seca}}{0.25}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa final} = 12.9936 \text{ kg}$$

Por lo tanto:

$$U = 0.97 * \text{masa seca en } S + \frac{0.75 * \text{Masa seca en } S}{0.25}$$

$$U = 4.3312 \text{ kg de pulpa seca} + 12.9936 \text{ kg de agua en pulpa final}$$

$$U = 17.3248 \text{ kg de pulpa batida}$$

Calculando licor gastado:

$$LU = S - U$$

$$LU = 17.8604 \text{ kg de pulpa} - 17.3248 \text{ kg de pulpa batida}$$

$$LU = 0.5356 \text{ kg de licor}$$

### j) Formación de hojas

En esta etapa se agregan 14L/kg de pulpa seca.

$$V = 14 * \text{masa seca en } U * \rho_{H_2O}$$

$$V = 14 * 4.3312 \text{ kg de pulpa seca} * 0.99631 \frac{\text{Kg}}{\text{L}}$$

$$V = 60.4130 \text{ kg de agua}$$

$$P3 = 4.3312 \text{ kg de pulpa seca} * 0.02$$

$$P3 = 0.0866 \text{ kg de pulpa seca perdida}$$

Calculando la masa de salida:

$$\text{Masa que sale} = 0.98 * 4.3312 \text{ kg de pulpa seca}$$

$$\text{Masa que sale} = 4.2446 \text{ kg de pulpa seca}$$

Calculando la cantidad de agua en la pulpa a Cs= 25% para la formación de hojas:

$$\text{Masa de agua en pulpa} = \frac{0.75 * \text{Masa seca que sale de la formación de hojas}}{0.25}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa final} = \frac{0.75 * 4.2446 \text{ kg de pulpa seca}}{0.25}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa final} = 12.7338 \text{ kg}$$

Por lo tanto:

$W = \text{Masa de agua en pulpa final} + \text{Masa seca que sale de la formación de hojas}$

$W = 12.7338 \text{ kg de agua en pulpa final} + 4.2446 \text{ kg de pulpa seca}$

$W = 16.9781 \text{ kg de hojas de pulpa}$

Por lo tanto, el agua que sale de la formación de hojas:

$LV = U + V - W - P3$

$LV = 17.3248 \text{ kg de pulpa batida} + 60.4130 \text{ kg de agua} - 16.9781 \text{ kg de hojas de pulpa}$   
 $- 0.0866 \text{ kg de pulpa seca perdida}$

$LV = 60.6731 \text{ kg de agua que sale de la formación de hojas}$

### **k) Prensado**

En esta etapa se considera que no hay pérdidas de masa de pulpa seca.

Calculando la cantidad de hoja prensada que sale con la ecuación 5.31:

$$Y = \text{masa seca en } W + \frac{0.45 * \text{Masa seca en } W}{0.55}$$

Calculando la cantidad de agua en la pulpa a  $C_s = 55\%$  para el prensado:

$$\text{Masa de agua en pulpa} = \frac{0.45 * \text{Masa seca que sale de la formación de hojas}}{0.55}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa final} = \frac{0.45 * 4.2446 \text{ kg de pulpa seca}}{0.55}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa prensada} = 3.4728 \text{ kg}$$

Por lo tanto,

$$Y = 4.2446 \text{ kg de pulpa seca} + 3.4728 \text{ kg agua en pulpa}$$

$$Y = 7.7174 \text{ kg de pulpa prensada}$$

La pulpa a la salida de la formación de hojas contiene 12.7338 kg de agua . Por lo tanto, el agua removida en el prensado:

$$X = \text{Agua inicial} - \text{Agua final}$$

$$X = 12.7338 \text{ kg de agua entrada} - 3.4728 \text{ kg en pulpa prensada}$$

$$X = 9.2610 \text{ kg de agua removida}$$

### I) Secado

En esta etapa también se considera que no hay pérdidas de masa de pulpa seca.

Calculando la cantidad de agua en la pulpa a  $C_s = 94\%$  para el secado:

$$\text{Masa de agua en pulpa} = \frac{0.06 * \text{Masa seca que sale de la formación de hojas}}{0.94}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa final} = \frac{0.06 * 4.2446 \text{ kg de pulpa seca}}{0.94}$$

$$\text{Masa de agua en pulpa final} = 0.2709 \text{ Kg de agua}$$

Por lo tanto, el agua evaporada:

$$Z = 3.4728 \text{ kg en pulpa prensada} - 0.2709 \text{ Kg de agua en pulpa secada}$$

$$Z = 3.2019 \text{ Kg de agua evaporada}$$

Por lo tanto,

$$HF = 4.2446 \text{ kg de pulpa seca} + 0.2709 \text{ Kg de agua en pulpa secada}$$

$$HF = 4.5155 \text{ Kg de hojas de bambú}$$

### Anexo 3. Cálculos para la evaluación de impactos ambientales del pre-diseño del proceso de extracción de pulpa celulósica para la producción de papel de bambú

a) Ejemplo de Cálculo para la Magnitud de la Contaminación Indirecta del Aire. Partiendo de la ecuación,

$$M_i = \Sigma[(I_i * W_i) + (E_i * W_E) + (D_i * W_D)]$$

se tiene que:

$$M_{CIA} = \Sigma[(7 * 0.40) + (10 * 0.40) + (10 * 0.20)]$$

$$M_{CIA} = 8.80$$

b) Ejemplo de Cálculo para el índice de VIA de la pérdida de especies vegetales. Al aplicar la ecuación VIA se obtiene:

$$VIA_i = \Pi[R_i^{wr} * RG_i^{wrg} * M_i^{wm}] = \Pi[5^{0.61} * 5^{0.22} * 4^{0.17}] = 4.36$$

### Anexo 4. Estimación de la demanda de papel artístico

Los artistas consultados han recibido e impartido clases en el CENAR y en MAKTUB café cultural en el centro histórico, entre ambos tienen 8 grupos de clases con aproximadamente 22 personas y cada uno utiliza 1 hoja por clase.

$$Demanda\ de\ hojas\ a\ la\ semana = 8\ grupos * 22\ personas = 176\ hojas$$

El gramaje preferido es de 160 gsm y de tamaño ¼ de pliego (32 x 47 cm) equivalente a 4,235.264 g, lo que implica el procesamiento de aproximadamente 10 kg de caña de guadua.

$$Gramos\ de\ hojas = 160 \frac{g}{m^2} * 32x47\ cm * \frac{1\ m^2}{10000\ cm^2} * 176\ hojas = 4,235.264\ g$$

## Anexo 5. Diseño de refinadora

