

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL PRETRATAMIENTO CON *STEAM-
EXPLOSION* AL BAGAZO DE CAÑA PARA LA OBTENCIÓN DE PULPA
ALCALINA PARA PAPEL**

DIANA CATALINA RAMÍREZ GÓMEZ

SANTIAGO GÓMEZ ÁLVAREZ

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

MEDELLÍN

20015

EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL PRETRATAMIENTO CON *STEAM-EXPLOSION* AL BAGAZO DE CAÑA PARA LA OBTENCIÓN DE PULPA ALCALINA PARA PAPEL

DIANA CATALINA RAMÍREZ GÓMEZ

SANTIAGO GÓMEZ ÁLVAREZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico

Director

GERMÁN CAMILO QUINTANA MARÍN

Ph.D. Ingeniero Químico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

MEDELLÍN

2015

Nota de aceptación

Director

Ph.D. Germán C. Quintana M.

Director de Ingeniería Química

Esp. I.Q. Fabio A. Castrillón H.

Medellín, 14 de Agosto de 2015

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1. Contexto	7
2. OBJETIVOS	9
2.1. Objetivo General	9
2.2. Objetivos Específicos	9
3. MARCO TEÓRICO.....	10
3.1. Bagazo de Caña	10
3.2. La química del tratamiento a vapor en materiales lignocelulósicos	10
3.3. Desmedulado	13
3.4. <i>Steam Explosion</i>	14
3.5. Procesos de Pulpeo	15
3.6. Propiedades Pulpa y Hojas.....	18
4. ANTECEDENTES	20
4.1. Caracterización de Bagazo de Caña.....	20
4.2. Desmedulado del Bagazo de Caña.....	22
4.3. Tratamiento con <i>steam explosion</i> al Bagazo de Caña	22
4.4. Pulpeo Alcalino.....	31
4.5. Propiedades de la Pulpa de Bagazo de Caña.....	32
5. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS.....	34
5.1. Materiales.....	34
5.1.1. Bagazo de caña.....	34
5.1.2. Hidróxido de sodio (Sosa)	35
5.2. Equipos.....	36
5.2.1. Molino.....	36
5.2.2. Equipo de <i>steam explosion</i>	36
5.3. Métodos.....	37
5.3.1. Troceado y Desmedulado.....	37
5.3.2. Pretratamiento con <i>steam explosion</i>	37

5.3.3. Pulpeo Alcalino	38
5.3.4. Formación de hojas	39
5.3.5. Caracterización.....	40
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	41
6.2 Caracterización química.	41
6.2 Efecto del <i>steam explosion</i> en la composición fisicoquímica	42
6.4 Pulpeos preliminares	46
6.5 Pulpeos finales	47
7. CONCLUSIONES.....	54
ANEXOS	55
ANEXO 1. Condiciones del tratamiento por <i>steam explosion</i>	55
ANEXO 2. Condiciones de proceso de pulpeos preliminares	57
ANEXO 3. Condiciones de proceso del pulpeos preliminares	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Composición del Bagazo de caña de origen Brasileiro	20
Tabla 2: Composición de diferentes tipos de bagazo de caña.	21
Tabla 3: Composición químicas del bagazo hawaiano.	21
Tabla 4: Condiciones de pulpeo en SE.	25
Tabla 5: Condiciones de operación del SE.	25
Tabla 6: Composición química del bagazo natural	27
Tabla 7: Composición Química del bagazo pretratado en SE.	28
Tabla 8: Composición Química de la pulpa.	29
Tabla 9: Composición química del Eucalipto pretratado por SE, OS e IL.	30
Tabla 10: Composición química del eucalipto pretratado por SE, OS.	30
Tabla 11: Condiciones de pulpeo y evaluación de la pulpa.	31
Tabla 12: Caracterización de pulpas de bagazo de caña obtenidas por <i>steam explosion</i>	33
Tabla 13: Caracterización de Materia Prima.....	42
Tabla 14: Condiciones de operación y rendimiento del tratamiento con <i>steam explosion</i>	44
Tabla 15: Caracterización de bagazo de cañal sometido a <i>steam explosion</i>	45
Tabla 16: Caracterización del material pretratado obtenido para posterior pulpeo	46
Tabla 17: Caracterización pulpeos preliminares.....	47
Tabla 18: Caracterización de pulpas de bagazo integral	48
Tabla 19: Caracterización de pulpas de bagazo desmedulado.....	48
Tabla 20: Propiedades de la materia prima de las pulpas	49
Tabla 21: Propiedades de las pulpas.....	49
Tabla 22: Características de las hojas formadas manualmente	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Residuos fibrosos de la fabricación de azúcar (bagazo de caña).	10
Figura 2: Estructura de la celulosa.....	11
Figura 3: Estructura química de la lignina.	11
Figura 4: Efecto del pretratamiento sobre la estructura de la biomasa lignocelulósica.	12
Figura 5: Comportamiento de la temperatura en el tiempo de cocción Kraft.....	17
Figura 6: Recuperación de masa en los ensayos de explosiones de vapor.....	23
Figura 7: Recuperación de masa en los ensayos de explosiones de vapor.....	23
Figura 8: Pérdida de peso por solubilidad en agua.....	24
Figura 9: Pérdida de peso por solubilidad en agua.....	24
Figura 10: Bagazo de Caña seco recolectado en Medellín	34
Figura 11: Metodología de pretratamiento con Steam-Explosion y Pulpeo al Bagazo de Caña.	35
Figura 12: Molino de cuchillas Restch SM 100	36
Figura 13: Equipo de <i>Steam Explosion</i>	37
Figura 14: Formador de Hojas	39
Figura 15: Astillas de Bagazo de Caña	41
Figura 16: Bagazo de Caña malla 40	41
Figura 17: Bagazo pretratado a severidad 3.0.....	43
Figura 18: Bagazo pretratado a severidad 3.5.....	43
Figura 19: Bagazo pretratado a severidad 3.8.....	43
Figura 20: Bagazo pretratado a severidad 4.0.....	43
Figura 21: Comportamiento de las propiedades del bagazo respecto a la severidad.....	45
Figura 22: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo integral	51
Figura 23: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo integral pretratado a severidad 3.0	51
Figura 24: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo integral pretratado a severidad 3.5	52
Figura 25: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo desmedulado	52
Figura 26: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo desmedulado pretratado a severidad 3.0	53
Figura 27: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo desmedulado pretratado a severidad 3.5	53

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto

La fabricación de pulpa, papel y derivados alcanzan cifras que sitúan esta industria entre las más grandes del mundo. Para el 2011 hubo una producción de 150 millones de toneladas de pulpa de madera y 275.5 millones de toneladas de papel y cartón que se produce a partir de pulpa de madera, pulpa de otras fibras y papel recuperado (Faostat, 2013)

Esta industria a nivel global siempre ha estado en constante desarrollo y su importancia está marcada por la demanda de sus productos, que abarcan las siguientes finalidades: para oficina e industria (producción bibliográfica y escritura), para fines sanitarios (papel higiénico), para embalaje (cartones y cartulinas), especiales o compuestos (encerados, fotográficos, con silicona y otros). (Cempre, 2010)

Se espera que la capacidad de producción mundial en la industria de pulpa y papel para el año 2016 sea de 155.8 millones de toneladas en fabricación de pulpa a partir de madera y de 281.4 millones en producción de papel y cartón. Año en el cual Latinoamérica representaría un 17.83% en producción de pulpa y un 46.83% en producción de papel y cartón, con Brasil como primer participante con un 13.6% en producción de pulpa. Colombia para el año 2012 representó un 1.04% en la producción de pulpa a partir de madera a nivel latinoamericano, y un 0.16% a nivel mundial; sin embargo, la importante participación de Colombia es notoria en la producción de pulpa a partir de otros materiales fibrosos, como lo es el bagazo de caña de azúcar, pues representa el 34.51% de producción a nivel latinoamericano y un 15.52% a nivel mundial. (Faostat, 2013)

La producción papelera es una de las principales industrias en el uso de recursos naturales y generación de residuos, uno de los materiales más importantes en la producción de pulpa y papel es el agua, de la cual se necesitan cerca de 100 litros para la producción de un kilogramo de papel junto con 2.3 kilogramos de madera, muchas plantas de producción implementan tratamientos de agua de desecho y sistemas de recirculación, lo que permite reciclar un 90% del agua. Esta industria tiene alta demanda de tierras para plantaciones, descargas líquidas, emisiones gaseosas y residuos sólidos. (Greenpeace, 2006)

Las materias primas fibrosas para la obtención de celulosa y papel, fueron papiro, lino, algodón y arbustos, muchas de estas se abandonaron por agotamiento o por no atender los volúmenes de la industria, ya hace un siglo se usa la madera como

materia prima, la cual garantiza un continuo abastecimiento. En Colombia debido al clima se puede cosechar caña en todos los meses del año, esta se emplea en la producción de azúcar lo cual genera como residuos agroindustrial bagazo de caña, materia prima en la producción de pulpa y papel en varias empresas colombianas. (Propal, 2010)

El pulpeo es la operación principal en la línea de producción de pulpa para papel, en esta se elabora una suspensión de fibras celulósicas liberando las fibras de los materiales lignocelulósicos, ya sea con un tratamiento químico, mecánico o una combinación de ambos. En el pulpeo químico se encuentra el proceso ácido, conocido como “método al sulfito” y el proceso alcalino donde se encuentran el método a la sosa y el método al sulfato o Kraft. (Sanjuán Dueñas, Proceso de fabricación de pulpas, 2003)

Para el tratamiento del bagazo de caña de azúcar se emplea normalmente el método a la soda, debido a que las plantas no maderables se impregnan con facilidad y tienen un contenido bajo de lignina. Este proceso requiere de 10 a 15% de NaOH referido al material fibroso en base seca y a una temperatura de 160°C, y se obtiene un rendimiento del 40 al 55%. Si todos los reactivos empleados en el proceso se descartaran, el costo de obtención de pulpa sería prohibitivo y la contaminación de los efluentes sería catastrófica, por tal motivo, la regeneración de licor negro (solución de reactivos residuales) a licor blanco (solución de reactivos para pulpeo) es una parte necesaria de la planta de producción de pulpa. La regeneración requiere sistemas de oxidación, equipos de evaporación, condensación y combustión, y con ello grandes cantidades de energía. (Sanjuán Dueñas, Proceso de fabricación de pulpas, 2003)

Una de las opciones para abarcar la problemática de gasto y regeneración de reactivos, es modificar el bagazo de caña a la entrada del digestor, reactor donde se realizará el pulpeo, con un pretratamiento con vapor de agua a alta presión y temperatura, seguido de una descompresión súbita denominado *steam explosion*, donde la presión modifica la pared celular de las fibras haciéndolas más susceptibles al ataque químico y al vapor de agua generando hemicelulosas (heteropolisacáridos de la madera) parcialmente hidrolizadas. (Ramos, 2003)

En general el papel es un producto de bajo valor en el mercado, el papel para escritura e impresión cuesta alrededor de \$3.000 por kilogramo, equivalentes a 250 hojas tamaño carta, por lo anterior es importante estudiar su línea de producción para evaluar los efectos económicos que trae el uso de nuevas tecnologías, así, se optimizan los procesos, se aumentan las utilidades y se reduce el consumo de materias primas y recursos naturales.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Evaluar el efecto del *steam explosion* como pretratamiento al proceso de pulpeo a la sosa con bagazo de caña para la obtención de papel.

2.2. Objetivos Específicos

Evaluar el efecto del *steam explosion* sobre las propiedades fisicoquímicas de las fibras y su caracterización.

Evaluar el efecto del *steam explosion* sobre el desmedulado del bagazo de caña.

Determinar una relación sobre las condiciones del proceso del pulpeo alcalino del bagazo de caña pretratado con *steam explosion*.

Comparar el requerimiento de reactivos por el proceso de pulpeo alcalino de bagazo de caña y bagazo de caña pretratado con *steam explosion*.

Comparar las propiedades físicas y mecánicas de las hojas de papel formadas con pulpa de fibra pretratada con *steam explosion* y sin pretratar.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Bagazo de Caña

El bagazo de caña (ver figura 1) se produce como consecuencia de la fabricación de azúcar y constituye un subproducto de esta industria. Es un material fibroso, heterogéneo en cuanto a su composición granulométrica y estructural, que presenta relativamente baja densidad y un alto contenido de humedad, en las condiciones en que se obtiene en el proceso de molienda de la caña.



Figura 1: Residuos fibrosos de la fabricación de azúcar (bagazo de caña).

El bagazo consta de dos partes fundamentales:

- La fibra: Son fibras relativamente largas, derivadas principalmente de la corteza y otros haces de fibra del interior del tallo. La longitud media de las fibras del bagazo es de 1 a 4 milímetros, y su ancho varía entre 0.01 y 0.04 milímetros.
- La médula: se deriva del parénquima, parte de la plata donde se almacena el jugo que contiene el azúcar.

El bagazo es una materia prima óptima y anualmente renovable para la producción de tableros aglomerados, papel, cartón, derivados de celulosa y productos químicos como el furfural o el xilitol.

3.2. La química del tratamiento a vapor en materiales lignocelulósicos

Los materiales lignocelulósicos son recursos renovables que se pueden utilizar directa o indirectamente para la producción de biomoléculas y productos químicos. Sin embargo, algunas de estas aplicaciones son limitadas por la estrecha relación que existe en los tres principales componentes de la pared celular vegetal,

celulosa (figura 2), hemicelulosa y lignina. Por esto es esencial el tratamiento previo para su posterior conversión debido a las diversas barreras físicas y químicas que inhiben en gran medida su susceptibilidad a procesos tales como la hidrólisis y la fermentación (Pereira, 2003).

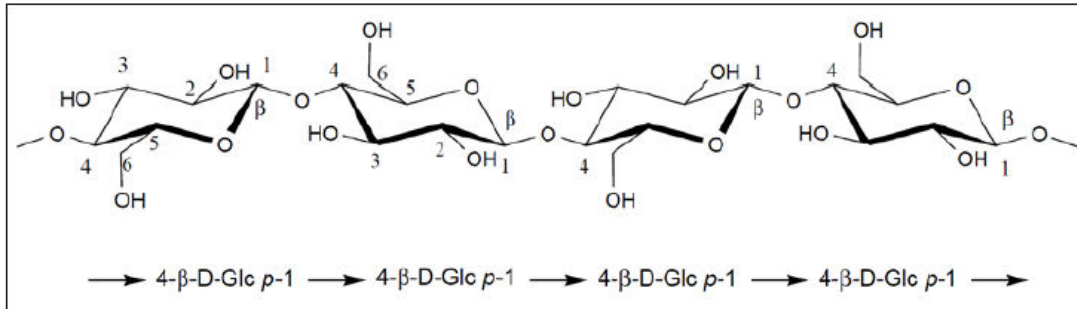


Figura 2: Estructura de la celulosa (Harris, 2012).

En general, las paredes celulares de las plantas se subdividen en pared primaria y secundaria. La distribución de la celulosa, hemicelulosas y lignina varía considerablemente entre estas capas, en los tejidos de la planta, la hemicelulosa se combina generalmente con lignina.

La estructura química de la lignina es muy complicada (figura 3) y se basa en tres monómeros precursores: alcohol coniferílico, alcohol sinapílico, y alcohol p-cumarílico. La propiedad más importante de esta macromolécula orgánica es su rigidez, lo que no sólo da fuerza al tejido de la planta, sino también evita el colapso de los elementos conductores de agua (Pereira, 2003).

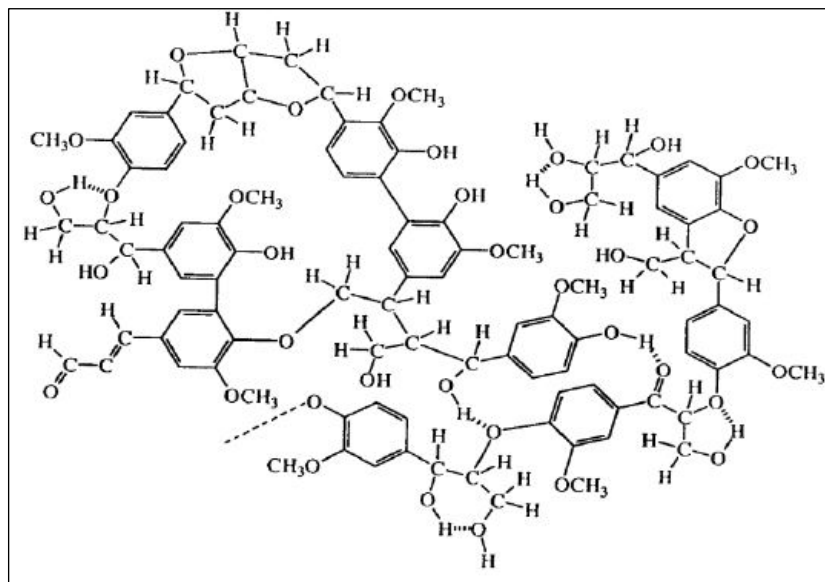


Figura 3: Estructura química de la lignina (Licona Aguilar, 2013).

Una variedad de métodos biológicos, físicos y químicos ha sido evaluado por su eficacia técnica y económica en el tratamiento previo de los residuos lignocelulósicos. Sin embargo, la biodegradación de la lignina es un proceso muy lento que puede ser considerado rentable sólo si se aplica junto a otros métodos físicos y/o químicos tales como fabricación de pasta termomecánica y la explosión de vapor. Los tratamientos químicos tienden a solubilizar la hemicelulosa y la lignina con el fin de exponer la celulosa a la hidrólisis ácida y/o enzimática. Pretratamientos físicos como la molienda y la irradiación de microondas han sido utilizados para mejorar la capacidad de hidrolisis de los materiales lignocelulósicos; sin embargo, la mayor desventaja de este tipo de tratamientos es el alto consumo energético. Las mejores opciones de pretratamiento son aquellas que combinan elementos de métodos físicos y químicos como por ejemplo vapor de alta presión, con o sin descompresión rápida (explosión), el cual se ha propuesto como una de las opciones para el fraccionamiento de la madera en sus tres componentes principales como se muestra en la figura 4, además se mejora de la susceptibilidad de la celulosa al ataque enzimático (Pereira, 2003).

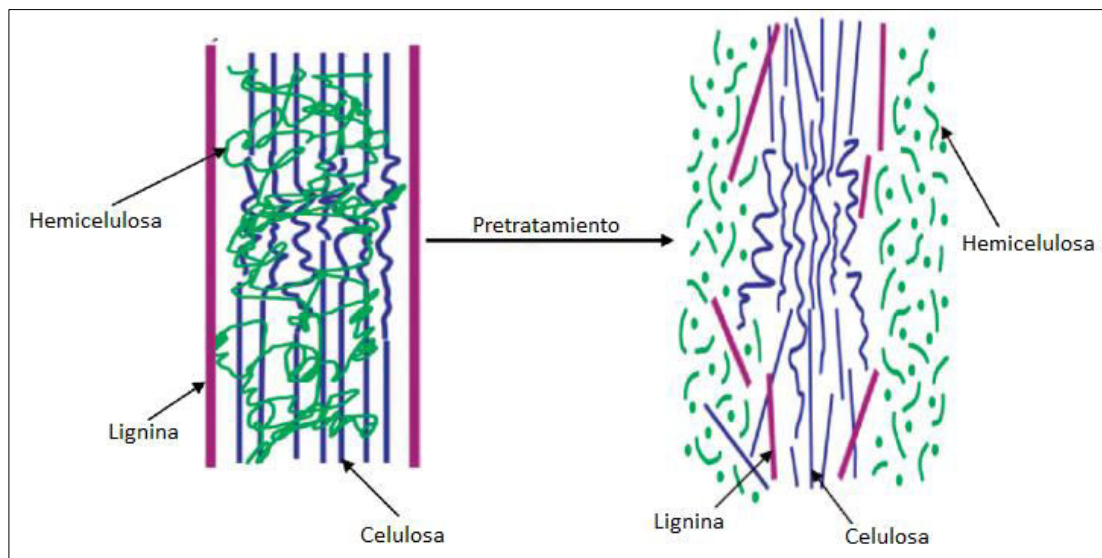


Figura 4: Efecto del pretratamiento sobre la estructura de la biomasa lignocelulósica (Wang, Chen, Sun, & Sun, 2015).

La pared celular presenta una resistencia inherente ante la conversión química y biológica debido a factores como la cristalinidad del núcleo de las microfibrillas, la heterogeneidad estructural y la complejidad de los polímeros de la matriz, entre otros, por lo que el pretratamiento es de vital importancia y es considerado como un paso crítico y de gran impacto sobre la digestibilidad de la celulosa, los requerimientos de energía en procesos posteriores y la demanda de tratamiento de aguas residuales (Wang, Chen, Sun, & Sun, 2015).

Físicamente, la caña de azúcar está constituida por cuatro fracciones principales, cuya magnitud relativa depende del proceso agroindustrial del azúcar: Fibra, sólidos no solubles, sólidos solubles, y agua. La fibra se compone de toda la fracción sólida orgánica, originalmente encontrada en el tallo de la caña. Los sólidos no solubles están constituidos principalmente por sustancias inorgánicas (rocas, suelo, y materiales extraños), y están muy influenciados por las condiciones del procesamiento agrícola de la caña, los tipos de corte y la cosecha. La fracción de sólidos solubles se compone principalmente de sacarosa, así como otros componentes químicos, tales como ceras, en una proporción más pequeña. En la literatura consultada se encontró composiciones de bagazo de caña con el siguiente contenido en promedio: celulosa 42%, hemicelulosa 25%, lignina 26%, cenizas 2%, extraíbles 5% (Canilha, y otros, 2012).

3.3. Desmedulado

En el bagazo integral el contenido de fibra es aproximadamente del 60%, el de médula es del orden del 30% y el 10% restante corresponde a heces fibrovasculares y células epidérmicas; al salir de los molinos en el proceso de producción de azúcar contiene entre 55 y 60% de fibra útil en base seca y entre 40 y 45% de médula (Licona Aguilar, 2013).

El desmedulado de bagazo consiste en enriquecer la fracción fibrosa extrayendo una corriente rica en médula. Esta operación es de gran importancia en la producción de pulpas debido a las grandes cantidades de tejido parenquimatoso (médula), lo que favorece el incremento en el consumo de reactivos por su alta higroscopicidad, además de disminuir el rendimiento, la blancura y las propiedades de resistencia del papel resultante (Aguilar Rivera, Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de la celulosa grado papel, 2011).

Existen tres tipos de desmedulado con rendimientos similares, su uso depende de la capacidad de la planta azucarera la cual entrega el bagazo desmedulado, o de la capacidad de la planta papelera, la cual puede recibir el bagazo integral. Estos son:

Desmedulado en seco: En este proceso se realiza la separación de la médula cuando el bagazo tiene una humedad entre 8 y 25%. Se aplica un secado artificial (Licona Aguilar, 2013).

Desmedulado en húmedo: Se efectúa la separación de la médula a la salida de los molinos azucareros con un contenido de humedad entre 48 y 52% (Licona Aguilar, 2013).

Desmedulado en suspensión: Se realiza con el bagazo mesclado con agua a una consistencia entre 2.0 y 3.0% o entre 6 y 12% (Licona Aguilar, 2013).

3.4. *Steam Explosion*

El *steam explosion* (SE) corresponde a un método físico-químico, pues se basa en la ruptura de la estructura lignocelulósica por acción de la temperatura y presión, en conjunto con catalizadores químicos, como el H₂SO₄ o el SO₂, que actúan a nivel de la pared celular, homogenizando la ruptura de la estructura lignocelulósica.

El método consiste en someter el material a alta presión y temperatura por un corto tiempo, despresurizando bruscamente, lo que lleva a la ruptura de las fibras. Aumentando la accesibilidad a la celulosa en la hidrólisis (Harris, 2012).

El tamaño de las partículas es uno de los factores que más afecta a la eficiencia de este proceso, sin embargo se puede compensar con la severidad; ésta corresponde a la intensidad del pretratamiento, es decir, cuando se tiene altas temperaturas y grandes tiempos de residencia, se habla de un tratamiento severo. Mientras que, cuando las condiciones son más suaves (menor temperatura y tiempo), el tratamiento es de menor severidad. La combinación de estos elementos es lo que determinará el rendimiento en la recuperación del material lignocelulósico (Harris, 2012).

El cálculo de la severidad se hace usando la siguiente expresión: (Jacquet, y otros, 2011).

$$S = \text{Log}_{10} \int_{t_2}^{t_1} \exp\left(\frac{T(t)-100}{14.75}\right) dt \quad (1)$$

Donde:

S = factor de severidad

T (t) = temperatura del proceso en °C

t = es el tiempo de residencia en minutos

14.75 = valor de la energía de activación a las condiciones donde la cinética es de primer orden y obedece la ley de Arrhenius

Los efectos acumulativos de las dos etapas del proceso incluyen modificación de las propiedades físicas del material (área superficial específica, la capacidad de retención de agua, color, cristalinidad de la celulosa, entre otras) hidrólisis de los componentes celulósicos (mono y oligosacáridos liberados), y modificación de la estructura química de la lignina.

Estos efectos permiten la apertura de las estructuras lignocelulósicas e incrementan la tasa de hidrólisis enzimática de los componentes de la celulosa. En general, los procesos de explosión de vapor se producen a temperaturas entre 200°C y 280°C, y se recomienda realizarlos a severidades inferiores a 4.0 debido a que hay menor degradación de las fibras de celulosa. (Jacquet, y otros, 2011).

El *steam explosion* permite la recuperación de los componentes constitutivos de la madera sin la degradación de cualquiera de ellos en favor de cualquier otro, esto a diferencia de muchos procesos ácidos o alcalinos usados en los procesos de fabricación de pulpa para producción de papel; adicionalmente ofrece otras ventajas como la posibilidad de generar un menor impacto ambiental, procesos químicos menos peligrosos y menor inversión de capital.

También el *steam explosion* solubiliza en el agua entre el 18 y el 34% de los componentes de la madera, principalmente azúcares monómeros y oligómeros. La fibra restante enriquecida en celulosa presenta una mejor solubilidad en solventes orgánicos y la lignina se disuelve fácilmente en mezclas de etanol, metanol acetona y acetato de etilo. Los rendimientos de lignina son alrededor del 20% de la madera original. Los enlaces hemicelulosa-lignina se rompen durante el proceso permitiendo que la celulosa se disuelva en el agua; este rompimiento también libera parte de la lignina soluble en el agua y permite su solubilidad en solventes orgánicos y alcalinos (Avellar & Glasser, 1998).

3.5. Procesos de Pulpeo

Cualquier proceso químico de pulpeo consiste esencialmente en mezclar la materia prima fibrosa (reactante) con una solución acuosa de sustancias inorgánicas (reactivo) denominada licor de cocción o licor blanco, cuya composición varía de acuerdo con el proceso que se utilice, y también con el uso que se le vaya a dar a la pulpa.

La mezcla resultante se alimenta a un digestor o reactor (por lotes o continuo), en el que se suministra calor, con lo cual el material fibroso sufre un proceso de cocción en el degradándose la lignina y solubilizándose en el medio (que puede

ser ácido o alcalino) liberando las fibras. El proceso se realiza en condiciones controladas de presión, tiempo y temperatura (Sanjuán Dueñas, 2003).

En este proceso tiene lugar varios fenómenos de transporte: difusión, adsorción, desorción, extracción, etc., que se engloban en el efecto de impregnación de la astilla. Catalizando la acción mediante temperatura, se desarrolla la reacción con la lignina, es decir, la deslignificación.

La cocción comprende entonces varias etapas que se describen a continuación:

- a. La primera etapa involucra la penetración del licor en las cavidades porosas de la materia prima fibrosa y la difusión de los reactivos en el licor, esta se ve influenciada por el tamaño de los poros del material fibroso y por las fuerzas capilares, mientras que la difusión es regulada solo por el área total de los poros. Para una cocción exitosa se requiere de una buena impregnación, pues en caso contrario el transporte de reactivos es incompleto, generando zonas sin reaccionar en las astillas que se presentan como rechazos de la cocción (incocidos).
- b. Posteriormente ocurre la etapa de adsorción de los iones de reactivo en la superficie de los constituyentes químicos del material fibroso.
- c. A continuación se presenta la reacción entre los constituyentes del material fibroso y los iones del licor mediante la catálisis de la temperatura. Simultáneamente se presentan otras reacciones como la depolimerización de los polisacáridos (hemicelulosas) y la saponificación de grasas y ceras (extraíbles) cuando se efectúa en un medio alcalino.
- d. Al concluir la reacción, los productos sufren una desorción.
- e. Por último, ocurre el transporte de los productos de reacción al exterior del material fibroso, con lo que quedan disueltos en el licor.

Al final de la cocción se separa la pulpa del licor residual (o licor negro), el cual contiene el reactivo que no fue consumido junto con los productos de descomposición de la lignina y sales de ácidos grasos, que también se formaron en el digestor. La pulpa se lava con agua para eliminar el licor residual que pudiera acompañarla y el licor negro se concentra en evaporadores y se quema para aprovechar el poder calorífico del material orgánico y recuperar en las cenizas los reactivos químicos inorgánicos que se usaron en el proceso. Esta última etapa se conoce como recuperación de reactivos.

Si todos los reactivos empleados en el proceso se descartaran, el costo de obtención de pulpa sería prohibitivo y la contaminación de los efluentes sería catastrófica, por tal motivo, la regeneración de licor negro es una parte necesaria de la planta de producción de pulpa (Sanjuán Dueñas, 2003).

Es conveniente señalar que el proceso de digestión se realiza en forma de una curva como la de la figura 5, en la que se pueden identificar las diferentes etapas que ocurren en el caso del proceso Kraft, el cual es análogo al pulpeo a la sosa.

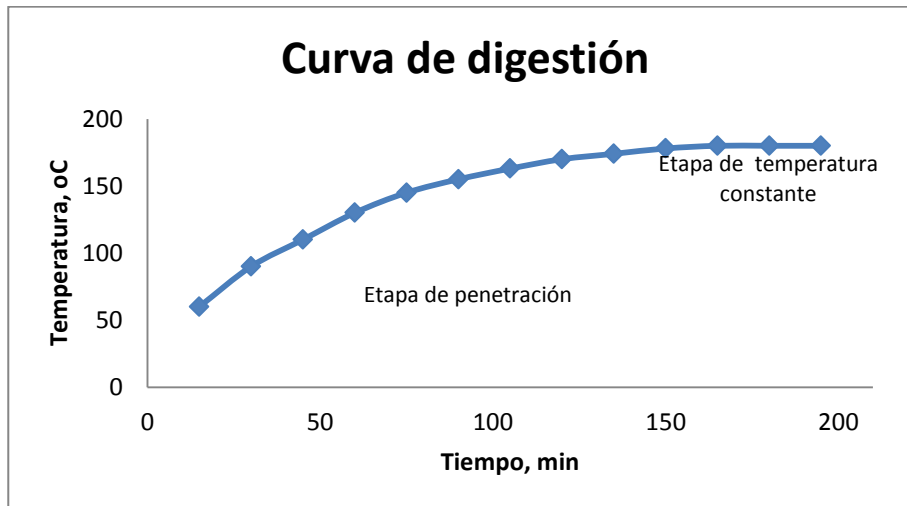


Figura 5: Comportamiento de la temperatura en el tiempo de cocción Kraft. (Sanjuán Dueñas, Proceso de fabricación de pulpas, 2003)

En el pulpeo se consideran ciertas variables que son de gran influencia en las propiedades de la pulpa, estas son:

Cantidad de reactivos inorgánicos: La adición de reactivos debe hacerse en función de la cantidad de lignina a eliminar para obtener una pulpa con las mejores propiedades; una cantidad alta puede producir degradación de los carbohidratos (entre ellos la celulosa), y si es baja la disolución de la lignina se verá limitada.

Tipo de licor de cocción: Para el tratamiento del bagazo de caña de azúcar se emplea normalmente el método a la soda, debido a que las plantas no maderables se impregnan con facilidad y tienen un contenido bajo de lignina; este proceso requiere de 10 a 15% de NaOH referido al material fibroso en base seca (Sanjuán Dueñas, 2003).

Tiempo y temperatura de cocción: Éstas son las variables independientes que en ocasiones se manejan como una sola, llamada "factor H". En general, puede decirse que a mayor temperatura, el tiempo de cocción disminuye. Y se determina con la siguiente ecuación:

$$H = \int_0^T e^{43.33 - \frac{16161.62}{T}} dT \quad (2)$$

Donde T es la temperatura del pulpeo.

Con frecuencia se usan temperaturas entre los 160 y 170°C y tiempos entre 30 y 60 minutos.

Relación licor/material fibroso (Hidromódulo): Es la relación en peso entre la cantidad de licor (líquido total) y material fibroso en base seca que se añaden al digestor, es calculado mediante la siguiente expresión.

$$\text{Hidromódulo} = \frac{\text{Peso licor Blanco} + \text{Peso licor Negro} + \text{Humedad de las astillas}}{\text{Peso material (Base Seca)}}$$

Tipo, tamaño y calidad de la materia prima fibrosa: Estos factores son determinantes para establecer los límites en las demás variables independientes, además de estar estrechamente relacionados con el rendimiento del proceso el cual depende del tipo y la calidad de la materia prima, así como del contenido de lignina y proporción de células de parénquima. Un contenido muy alto de parénquima no solo afecta el rendimiento, sino también incrementa el consumo de álcali, disminuye la resistencia de la pulpa y aumenta el contenido de finos, con lo que baja drásticamente la drenabilidad. Por esta razón, el bagazo se desmedula para eliminar las células de parénquima antes de la cocción. El rendimiento del proceso se encuentra entre el 40 y el 55%.

3.6. Propiedades Pulpa y Hojas

Una vez se obtiene y se lava la pulpa luego del proceso de cocción, se debe caracterizar y medir sus propiedades fisicoquímicas, con el fin de hacer un control de calidad o evaluar los cambios y propuestas de nuevos procesos. De esta manera se miden propiedades a la propia pulpa como lo son:

Freeness: Da una medida de la velocidad a la que una suspensión diluida de pulpa puede drenar (TAPPI, 1999).

Para evaluar las propiedades mecánicas y caracterizar las hojas es necesario preparar o formar hojas “hechas a mano”, de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma TAPPI T-205 (Tappi, 2002).

Las propiedades de un papel en particular, dependen en un alto grado de su contenido de humedad debido a que es un material higroscópico y entra en

equilibrio con la humedad del ambiente que lo rodea, variando así su contenido. Sin embargo, No se puede generalizar sobre los efectos de la humedad relativa en las propiedades del papel, los cambios además dependen de la composición fibrosa, el grado de refinación, los aditivos agregados, el tratamiento de la superficie de la hoja y del equipo utilizado por el fabricante. (MAG Paper de Mexico S.A de C.V, 2014).

El papel fabricado tanto en máquinas fourdrinier (de mesa plana), como en máquinas de formadoras (de cilindros), tiene una estructura relativamente áspera en el lado inferior, que queda en contacto con la tecla de formación, denominado lado tela y es más liso en el lado superior llamado fieltro. Algunas de las pruebas físicas y ópticas se deben realizar por cada una de las dos caras del papel, independientemente (MAG Paper de Mexico S.A de C.V, 2014).

El papel tiene dos sentidos, debido a la orientación que sufren las fibras en la dirección en que corre la máquina y también al esfuerzo de tensión que se aplica al papel durante el prensado y el secado. Se denominan sentido de fabricación o de máquina (SF o SM) y sentido transversal (ST). Cuando el papel ha sido hecho en máquina formadora, esta diferencia es más marcada que cuando ha sido hecho en máquina fourdrinier, debido a que en esta última, la distribución de las fibras es más aleatoria y en las de formadoras mayor cantidad de fibras quedan orientadas en SF (MAG Paper de Mexico S.A de C.V, 2014).

Dentro de las pruebas más significativas que se aplican para determinar la calidad de las hojas de papel se encuentran las siguientes:

Gramaje (weight per unit area): De acuerdo con la norma TAPPI 410 el peso del papel se expresa por unidad de área, en gramos por metro cuadrado en el sistema métrico. En el sistema inglés se denomina peso base y se expresa en libras por resma, libras por mil hojas o libras por mil pies cuadrados. Una resma puede tener 480 o 500 hojas y de distintos tamaños, por lo tanto para dar el peso base se debe indicar el tamaño y número de hojas de la resma. Esta es una de las principales propiedades medidas al papel (TAPPI, 2013).

Espesor o calibre de papel (Thickness): Dicha propiedad medida por el método T 411 om-97, se define como como la distancia perpendicular entre 2 superficies paralelas, planas y circulares con diámetro aproximado de 16 cm. Se determina con un micrómetro. El calibre afecta las propiedades físicas, ópticas y eléctricas de la hoja de pulpa o papel. La prueba es útil para el trabajo de investigación, control de rutina, el diseño de productos de uso final, y para las pruebas de aceptación de conformidad con las especificaciones. (TAPPI, 1997).

4. ANTECEDENTES

4.1. Caracterización de Bagazo de Caña.

La composición del material lignocelulósico depende no solo del tipo de material, sino también del área donde fue cultivado y de las condiciones de cultivo y cosecha. No obstante la caracterización permite establecer un aproximado de la composición del mismo, y se realiza comúnmente empleando los procedimientos indicados en las normas de la ASTM.

De acuerdo con Canilha et al., 2012, quien caracterizó un bagazo de caña de origen brasilero encontró la composición mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición del Bagazo de caña de origen Brasilero (Larissa, y otros, 2012)

Componente (%)	Pitarelo ^{1*}	da Silva et al. ²	Canilha et al. ^{3*}	Rocha et al. ^{4*}	Brienzo et al. ⁵	Rabelo et al. ⁶
Celulosa	41.1	38.8	45.0	45.5	42.4	38.4
Hemicelulosa	22.7	26.0	25.8	27.0	25.2	23.2
Lignina	31.4	32.4 [#]	19.1	21.1	19.6	25.0
Cenizas	2.4	2.8	1.0	2.2	1.6	1.5
Extraíbles	6.8	—	9.1	4.6	—	—
Otros	—	—	—	—	—	—

* Base libre de extraíbles

lignina y otros

Solventes de extracción: ¹ diclorometano, etanol:tolueno (1:2), etanol, y agua caliente; ² ninguno; ³ agua y etanol; ⁴ etanol; ⁵ etanol; ⁶ ninguno

Aguilar et al. 2011, en la Tabla 2 muestra la composición de diferentes tipos de bagazo de caña donde se puede observar como la composición del bagazo de caña panelera es similar a la presentada en otros estudios para este tipo de material, excepto para los extractos, los cuales representan un 23% de este material. Este porcentaje significativamente más alto al reportado en otros estudios para bagazo de caña azucarera (1%) es debido a que la extracción del zumo de la caña panelera es menos eficiente que para la azucarera, por lo cual el

porcentaje de azúcar presente en los extractos para este material es mayor (19%), haciendo que el porcentaje de extractos totales se vea incrementado.

Tabla 2: Composición de diferentes tipos de bagazo de caña. (Aguilar Valencia, 2011)

Compuesto	Francia Caña azucarera	Venezuela Caña azucarera	México Caña azucarera	Colombia Caña azucarera
Celulosa	45	52,25	35,01	35,7
Hemicelulosa	26	19,27	23,0208	20,7
Lignina	20	12,86	23,9	17
Acetato				2,67
Cenizas	2,1	9,53		3,13
Humedad		7,5		24,6
Extractos		0,91		23

Por otra parte, al referirse a materiales lignocelulósicos no maderables como el bagazo de caña, se presentará un alto contenido de tejido parenquimatoso muy rico en pentosas, y las proporciones de los constituyentes químicos que la integran varían en función del contenido de parénquima o médula, como se observa en la tabla 3.

El contenido de alfa celulosa es más alto en el bagazo desmedulado, y el de ceniza es alto en la fracción de la médula. El contenido de lignina es aproximadamente el 75% de las maderas blandas y semejantes al de las maderas duras, lo que indica la posibilidad de producir pulpa de alto rendimiento de bagazo desmedulado bajo condiciones óptimas de pulpeo (Sanjuán Dueñas, 1997).

Tabla 3: Composición químicas del bagazo hawaiano. (Sanjuán Dueñas, 1997)

	Entero	Fibra	Médula
Alfa celulosa (%)	38,1	32,4	34,8
Holocelulosa (%)	76,6	77,8	77,7
Lignina (%)	20,2	20,8	20,2

	Entero	Fibra	Médula
Pentosanos (%)	26,7	27,9	28,4
Ceniza (%)	1,67	0,7	2,29
Extraíbles orgánicos (%)	4,35	1,92	5,3
Extraíbles agua caliente (%)	2,5	0,9	1,9

4.2. Desmedulado del Bagazo de Caña

Se pueden llevar a cabo procesos de desmedulado en seco, los cuales se ejecutan con 15 a 20 % de humedad del bagazo, con la desventaja de poca eficiencia de separación de las médulas entre 30 y 50 % de la cantidad original. En el desmedulado en húmedo se procesa el material tal como sale de la industria productora, es decir con una humedad del 50 %. Tiene la ventaja de mayor eficiencia en la separación de la médula, (eficiencia mínima de separación es del 60 % de la medula original). En el desmedulado en suspensión la médula, polvo y materias extrañas son exhaustivamente separados de la fibra. El bagazo ingresa al proceso de desmedulado con una consistencia de 10 a 18 % (80 a 90 % de humedad). En general éste es usado como segunda etapa de desmedulado y se lo ubica en la planta de preparación de la pasta (planta celulósica). (Delfin Britos & Ramírez, 2007)

4.3. Tratamiento con *steam explosion* al Bagazo de Caña

Con el pretratamiento con SE del material lignocelulósico se busca remover hemicelulosas y aumentar la porosidad y área de contacto de los materiales para facilitar la hidrólisis. Durante el pretratamiento una fracción de hemicelulosa es hidrolizada. (Aguilar Valencia, 2011)

En los últimos veinte años se ha usado el pretratamiento con SE únicamente o combinado con otro tipo de métodos complementarios, debido a que no se requieren químicos o en ocasiones solo en pocas cantidades. Según los experimentos de Kaar, Gutierrez y Kinoshita, 1998, el pretratamiento con SE realizado a un bagazo en temperaturas entre los 188 a 243°C y tiempos de residencia entre los 0,5 y 44 minutos mejoró la digestibilidad enzimática en comparación con el material no pretratado. Los datos de recuperación de masa se

presentan en las figuras 6 y 7, la variación está entre el 78 y 99% con respecto al material alimentado, debido a la baja severidad y/o baja temperatura. La pérdida de peso por extraíbles solubles en agua varía entre el 9 y 28%, en las figuras 8 y 9 se muestra éste comportamiento.

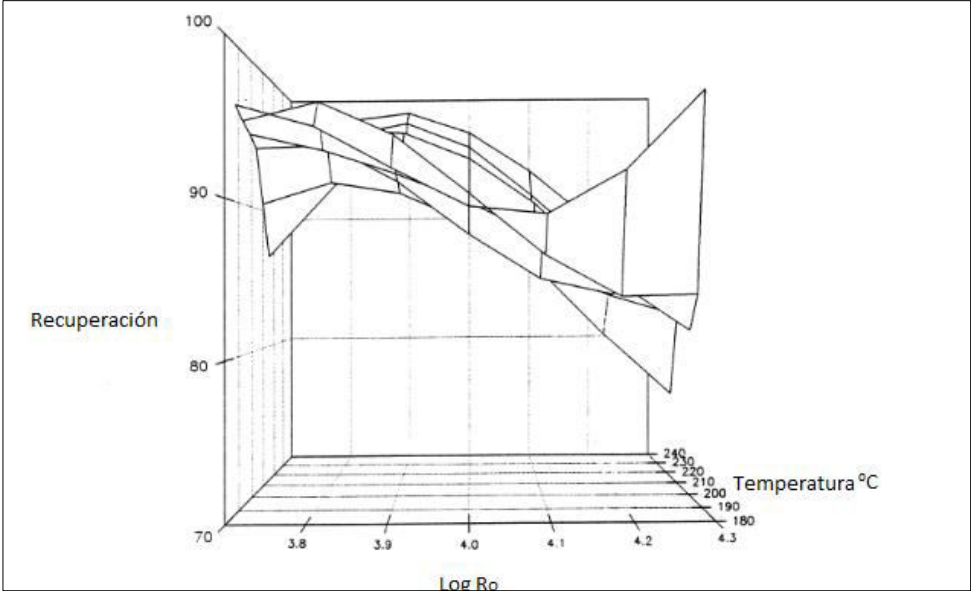


Figura 6: Recuperación de masa en los ensayos de explosiones de vapor. (Kaar, Gutierrez, & Kinoshita, 1998).

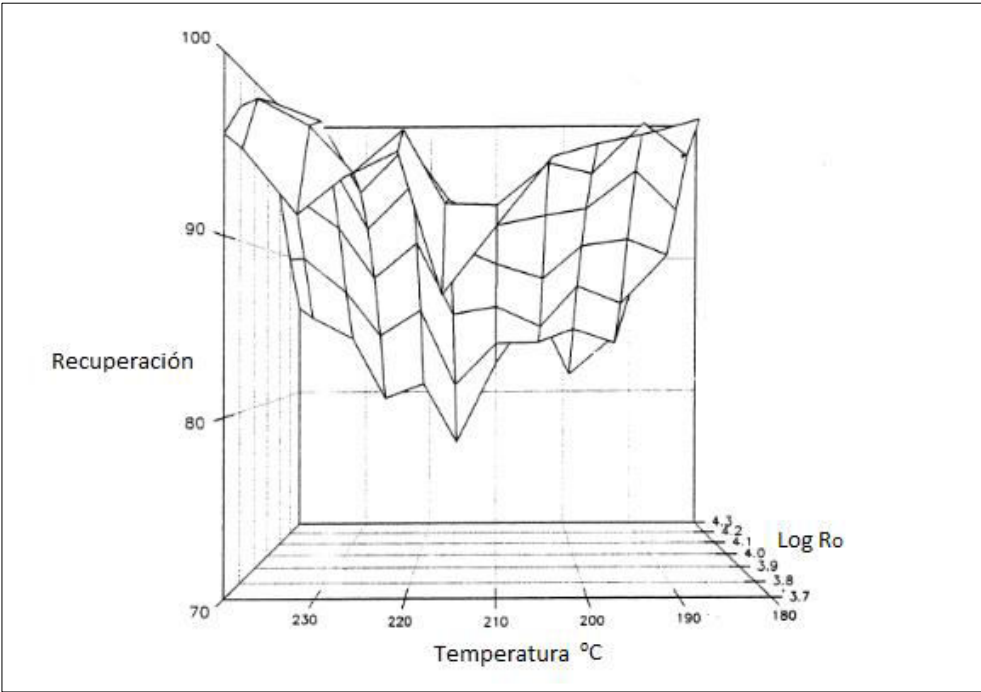


Figura 7: Recuperación de masa en los ensayos de explosiones de vapor. (Kaar, Gutierrez, & Kinoshita, 1998).

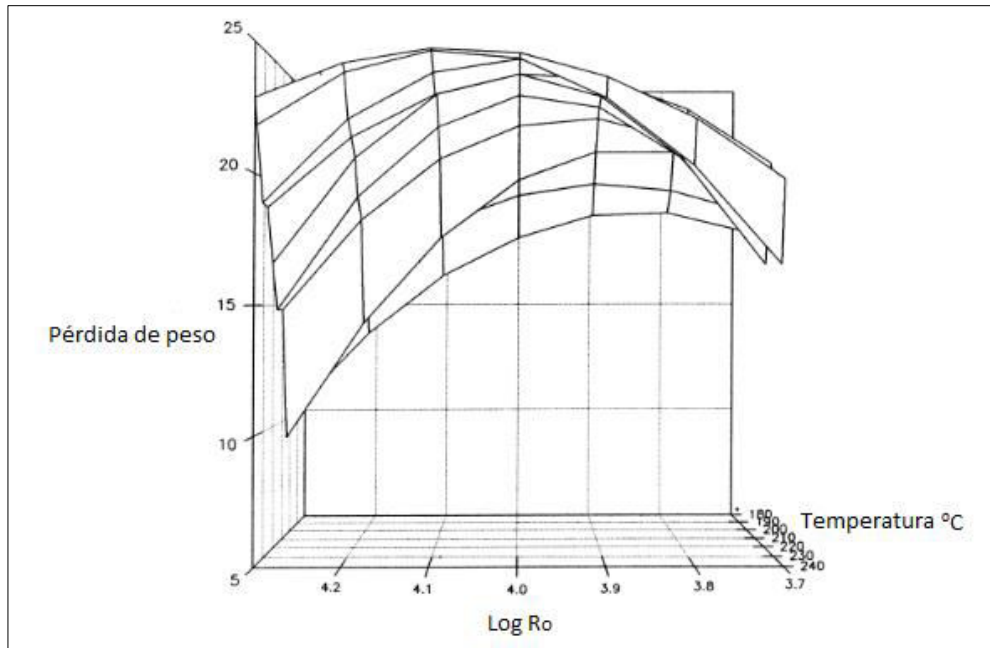


Figura 8: Pérdida de peso por solubilidad en agua. (Kaar, Gutierrez, & Kinoshita, 1998).

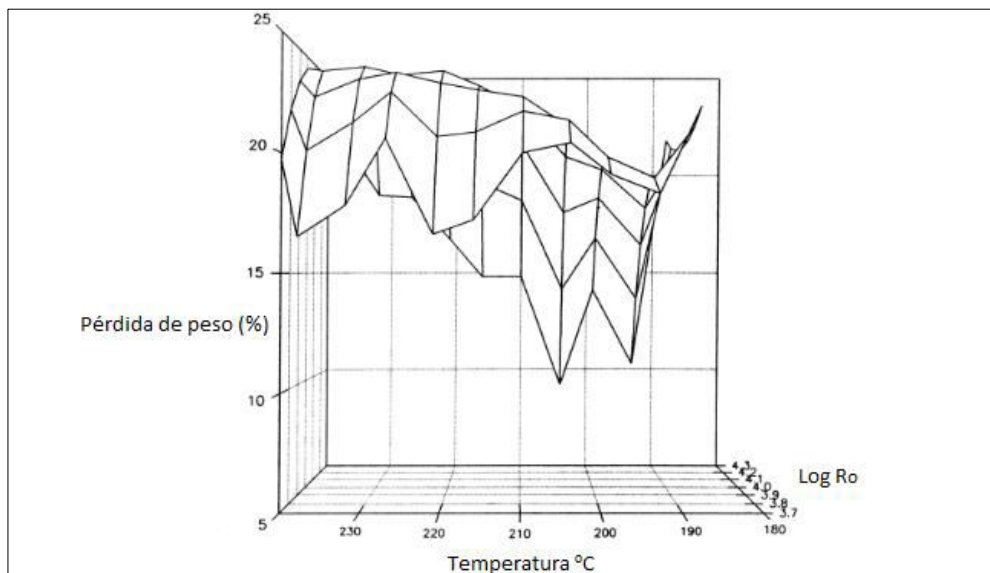


Figura 9: Pérdida de peso por solubilidad en agua.

Se han propuestos métodos de pulpeo continuo en SE para bagazo de caña desmedulado, Los experimentadores Richard y D'Agostino en 2000, fabricaron pulpa en SE con una carga química de 8% de sulfito de sodio y 1% de hidróxido de sodio. Según las condiciones enumeradas en la tabla 4. (Richard & D'Agostino, 2000).

Tabla 4: Condiciones de pulpeo en SE. (Richard & D'Agostino, 2000)

Condición	Log Ro	Presión (psig)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	3.0	225	203	1.0
2	3.25	225	203	1.5
3	3.5	225	203	3.0

A las pulpas se les hicieron ensayos de resistencia (índice de tracción, estallido, desgarro) y de brillo, de acuerdo a los métodos TAPPI. La resistencia de la pulpa aumenta a medida que aumenta la severidad del proceso. Por un aumento en el factor de severidad desde 3,25 a 3,5, el índice de resistencia a la tracción se incrementó 40% y la resistencia a la rotura aumentó un 38%. La adición de sulfito de sodio dio como resultado el aumento del índice de tracción, estallido, desgarro y brillo, con un rendimiento correspondiente de 60%. (Richard & D'Agostino, 2000)

En otro proyecto estos autores impregnaron lotes de bagazo con sulfito de sodio y carbonato de sodio utilizados en diversas cargas entre 4% -13% y 2% -2,5% respectivamente. Con una relación licor madera (L/W) constante a 4:1. La impregnación química se llevó a cabo en baños de agua de temperatura controlada a 60 ° C durante 20 horas. Las condiciones de pulpeo por SE se presentan en la tabla 5. (Richard, Davies, DuPlooy, Kerr, & D'Agostino, 2001)

Tabla 5: Condiciones de operación del SE. (Richard, Davies, DuPlooy, Kerr, & D'Agostino, 2001)

Condición	Log Ro	Presión (kPa/psig)	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia (min)
1	3.2	1550/220	203	1.5
2	3.2	1150/167	190	4.0
3	3.5	1550/225	209	3.0
4	3.5	1450/210	200	4.0
5	3.6	1260/183	194	6.0
6	3.6	1450/210	200	5.0
7	3.7	1450/210	200	6.0

En las condiciones de SE probadas, una carga constante de sulfito de 8.5% (como Na_2O) y con un factor de severidad constante de 3.5 el rendimiento de la pulpa disminuyó con cantidades crecientes de carbonato. El rendimiento disminuyó en 10% a una carga de carbonato de 3,2% contra 3,0%. El tiempo de residencia determinado por condiciones óptimas es de 6 minutos. (Richard, Davies, DuPlooy, Kerr, & D`Agostino, 2001)

Por otra parte, el SE ha sido utilizado como pretratamiento en un proceso de producción de bioetanol a partir de bagazo de caña propuesto por Amore, et al. 2013, en el que se demostró la eficacia del tratamiento con SE sobre las fibras. Los ensayos realizados a 200g de material en base seca y temperaturas de 200°C, 215°C y 230°C, con una duración de 5 minutos cada uno, arrojaron como temperatura óptima 215°C. El material se sometió posteriormente a proceso de sacarificación y fermentación, presentando una conversión a etanol de 0,3g por cada gramo de glucosa (Amore, Ballesteros, Manzanares, Sáez, Michelena, & Ballesteros, 2013).

Rocha et al. 2012, aplicaron el pretratamiento con SE y luego la deslignificación alcalina en una planta piloto a 20 tipos diferentes de caña azucarera con el propósito de determinar la composición del bagazo después del pretratamiento y evaluar la reproducibilidad del proceso completo. El pretratamiento de SE se realizó en un reactor de 200 litros a una presión alrededor de 1.3Mpa equivalente a 190°C en el reactor y un tiempo de residencia de 15 minutos, seguido de una descompresión súbita. Posteriormente se llevó el material recuperado del SE a un reactor de 350 litros usando una relación sólido-líquido 1:10 con NaOH al 1.0% p/v; la reacción de deslignificación se realizó a 100°C durante una hora. En las tablas 4, 5 y 6 se muestran los resultados de las propiedades evaluadas tanto al bagazo natural como pretratado y a la pulpa obtenida. En dicho estudio se obtuvo un aumento de celulosa de alrededor del 87% y eliminación de lignina y hemicelulosa por encima del 90% (Rocha, Gonçalves, Oliveira, Olivares, & Rossel, 2012).

Tabla 6: Composición química del bagazo natural (Rocha, Gonçalves, Oliveira, Olivares, & Rossel, 2012)

Muestra	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas	Extraíbles
1	42,4	22,9	21,5	3,4	9,3
2	42,7	23,7	21,9	2	3,9
3	43,5	25,3	22,1	2,1	4
4	41,8	18,9	23	2,5	3,7
5	43,2	26,9	22,5	3,5	4
6	44,8	26,7	22,6	2,6	4
7	45,7	26,5	21,5	2,9	3,7
8	44,9	26,3	22,1	2,7	3,9
9	45	26,4	23,4	2,5	2,7
10	43,1	25,7	23,9	3,7	2,9
11	41,5	26,8	24,7	5,5	2,4
12	43,9	26,1	23,3	4,6	2,5
13	40,6	26,7	24,6	4,6	3,6
14	40,9	26,9	23,9	5,1	3,2
15	42,3	25,3	22,5	1	5,8
16	45,2	24,7	21,8	1	5,7
17	42,3	24,3	21,9	1,5	6
18	42,8	24,1	22,4	1,5	4,9
19	4,9	24,2	22,5	1,5	5,3
20	43,2	26	25,4	1,4	4
Promedio	43,1	25,2	22,9	2,8	4,3
Desviación estándar	1,4	1,9	1,1	1,4	1,6
Intervalo de confianza	0,6	0,8	0,5	0,6	0,7

Tabla 7: Composición Química del bagazo pretratado en SE. (Rocha, Gonçalves, Oliveira, Olivares, & Rossel, 2012)

Muestra	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas	Rendimiento
1	55.9	4.4	37.1	2.5	66.2
2	55.5	4.1	37.6	2.8	65.7
3	57.6	4.5	34.5	1.8	67
4	56	8.5	30.1	5.2	66.6
5	61.4	7.4	29.9	1.3	64.2
6	56.8	7.7	33.8	1.5	65
7	57.2	6.6	34.4	1.6	65.5
8	56.5	7.3	34.4	1.6	65.8
9	58	7.5	33.6	1.3	66
10	55.8	9.2	33.6	1.4	67
11	56.9	7.8	34.0	1.9	66.8
12	59.4	7.8	30	2.2	64.7
13	57	7.8	32.2	2.4	65.5
14	57.2	7.2	32.4	2.0	66.3
15	56.7	6	30.0	4.4	67
16	56.3	6.4	30.3	4.4	66.4
17	58.8	5.3	30.5	4.7	66
18	58.5	5.3	30.5	4.7	66.1
19	57.6	5.7	30.4	4.5	67.2
20	60.9	5.0	31.2	3.2	66.5
Promedio	57.5	6.6	32.5	2.8	66.1
Desviación estándar	1.6	1.5	2.4	1.4	0.8
Intervalo de confianza	0.7	0.6	1.0	0.6	0.4

Tabla 8: Composición Química de la pulpa. (Rocha, Gonçalves, Oliveira, Olivares, & Rossel, 2012)

Muestra	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas	Rendimiento másico (%)
1	82,2	4	10,5	3,5	55,8
2	82,9	4,1	9,6	3,6	55,4
3	88	3,9	4,5	3,5	51
4	88	3,6	4,8	3,6	50,9
5	88,6	4,2	5	2,5	50
6	86,5	4,3	5,5	2,9	52,5
7	89,4	4	4,6	2	48,1
8	90,9	4,3	4,8	1,1	47,9
9	88,6	4,1	4,2	3,5	50,5
10	89,4	4,1	4,5	3,4	49,9
11	86	4,4	5,3	3,5	52
12	87,6	2,8	5,8	5,7	53,2
13	84,5	3,1	6,5	5,5	54
14	83	3,2	8,3	5,1	53,8
15	82,3	3,2	9,4	5,1	55,5
16	89,6	3,4	5,5	1,4	48
17	84,6	3,6	9,4	2	54,4
18	88,5	4,9	4,3	2,5	49,8
19	88,1	5	4,3	2,4	48,8
20	88	4,9	4,5	2,6	49,2
Promedio	86,8	4	6,1	3,3	51,5
Desviación estándar	2,7	0,6	2,1	1,3	2,6
Int de conf	1,2	0,3	0,9	0,6	1,2

El pretratamiento con SE se ha realizado de diferentes maneras, una de ellas es haciendo una impregnación previa del material lignocelulósico con catalizadores químicos como el H₂SO₄ o el SO₂. Correa, 2012. Impregnó astillas de eucalipto y álamo con SO₂ al 3% p/p, durante aproximadamente 12 horas y posteriormente se llevó al SE donde se inyectó vapor a 200°C (16,4 atm) por 5 minutos; adicionalmente pretrataron ambos materiales con otros métodos como el organosolv (OS), hidrólisis enzimática (enzima celobiasa) y líquido iónico (IL) [cloruro de 1-etil-3metilimidazol (emimCl)]. Los métodos se compararon por medio de caracterización física y química (tablas 7 y 8), con lo que se obtuvo que el OS generó el material con mayor contenido porcentual de glucosa (eucalipto: 90,12%; álamo: 77,82%), removiendo casi la totalidad de la lignina y parte de la hemicelulosa. El SE fue el método que más hemicelulosa removió, pasando de un 17,5% a solo un 4,5% para el eucalipto y de un 17,2% a un 7,2% para el álamo. El material pretratado con emimCl no presentó cambios significativos en su composición química (Harris, 2012).

Tabla 9: Composición química del Eucalipto pretratado por SE, OS e IL (Harris, 2012).

Componente	SE	OS	IL	S/P*
Lignina (%)	31,7 ± 0,7	4,4 ± 0,9	29,4 ± 1,2	25,1 ± 1,4
Hemicelulosa (%)	4,5 ± 0,4	6,2 ± 2,8	16,3 ± 0,6	17,5 ± 0,5
Celulosa (%)	56,9 ± 1,7	90,1 ± 6,5	42,4 ± 1,7	43,4 ± 1,3

* sin pretratar

Tabla 10: Composición química del eucalipto pretratado por SE, OS.

Componente	SE	OS	S/P
Lignina (%)	30,6 ± 1,2	8,4 ± 1,4	24,4
Hemicelulosa (%)	7,2 ± 0,5	8,5 ± 0,7	17,2
Celulosa (%)	58,1 ± 0,6	77,8 ± 0,5	47,6

4.4. Pulpeo Alcalino

Para fabricar papel es necesario separar las fibras de celulosa, que están fuertemente ligadas por lignina y producir la pasta o pulpa. Se debe eliminar la mayor parte de la lignina antes de aislarse las porciones más importantes de la hemicelulosa o de la celulosa. A este proceso se le denomina pulpeo, el pulpeo alcalino usa para el ataque selectivo de la lignina NaOH llamado licor blanco. (Sanjuán Dueñas, Proceso de fabricación de pulpas, 2003)

Khristova et al. En 2004, fabricaron pulpa con bagazo de caña, y con mezclas de bagazo de caña y bambu, usando como licor blanco de sosa con y sin antraquinona y sulfito alcalino-antraquinona. Las condiciones de pulpeo y resultados de las condiciones óptimas según el grado de deslignificación y rendimiento, se muestran en la tabla 11. (Khristova, Kordsachia, Patt, Karar, & Khider., 2006)

Tabla 11: Condiciones de pulpeo y evaluación de la pulpa. (Khristova, Kordsachia, Patt, Karar, & Khider., 2006)

Proceso de pulpeo	Sosa	Sosa-AQ	Sulfito Alcalino-AQ	
	Bagazo 5	Bagazo 6	Bagazo 8	Bagazo 9
Condiciones de pulpeo				
Álcali activo (%)	12.4	10.9	12.4	12.4
Relación química			40:60	30:70
Antraquinona (%)	-0-	0.1	0.1	0.1
Relación L/W	4:1	4:1	4:1	4:1
Temperatura máxima (°C)	165	155	160	160
Tiempo para max temp (min)	58	57	57	57
Tiempo en max temp (min)	90	60	60	60
Rendimiento (%)	54.2	57.9	60.7	57.8
Propiedades de la pulpa				
Viscosidad (ml/g)	912	982	1061	1048
Blancura ISO	33.6	29.6	35	36.7
Numero Kappa	13.9	12.2	6.2	6.5
<i>Freeness</i>	13.0	13.5	14	15
Tiempo de ruptura (min)	10	11	10	8
Densidad aparente (g/cm ³)	0.71	0.73	0.76	0.75
Factor de funcionalidad	6.3	6.8	6.9	6.8
Índice de tracción (Nm/g)	67	74.4	78.8	73.2

Proceso de pulpeo	Sosa	Sosa-AQ	Sulfito Alcalino-AQ	
	Bagazo 5	Bagazo 6	Bagazo 8	Bagazo 9
Índice de rasgado (mNm ² /g)	5.8	6.1	6.0	6.2
Índice de estallido (kPam ² /g)	4.1	4.8	5.3	4.6

Por su parte Lei y colaboradores realizaron el pulpeo a la soda de 280g (base seca) de bagazo de caña en un reactor de 0.4m³ utilizando 17% de NaOH, a temperatura de 160°C durante 90 minutos, con una relación de licor/bagazo de 5.5, obteniendo un rendimiento de 57.93% y un número Kappa de 16.6.

Cordeiro y colaboradores por su parte llevaron a cabo un pulpeos alcalinos de bagazo de caña a una temperatura de 160°C durante una hora utilizando diferentes cantidades de NaOH: 11, 14 y 17% y con una relación S:L de 1:5. Las pulpas producidas con 11% de NaOH tuvieron un número Kappa alrededor de 54 y rendimientos del 34.5% y contenían mucho material incocido. Las pulpas producidas usando 14% de NaOH tuvieron rendimientos del 40.6% y número Kappa de 28.4. Por último, las pulpas fabricadas con 17% de NaOH tuvieron rendimientos del 51.1% y número Kappa de 19.3, además de demostrar que esta cantidad era suficiente para eliminar todo el material no celulósico (Cordeiro, Ashori, Hamzeh, & Faria, 2013).

4.5. Propiedades de la Pulpa de Bagazo de Caña

Las fibras vegetales no maderables son una importante fuente de materiales en países donde los boques de madera son limitados. Bagazo, Bambú, paja y caña son las materias primas dominantes utilizadas en la fabricación de pulpa, papel y tableros.

En la Tabla 12 se presentan las características de la pulpa obtenida por pretratamiento con SE a partir de Bagazo, Kenaf y Lino. La pulpa del Bagazo mostró alto rendimiento y excelentes propiedades del papel. La fuerza de la explosión de pulpa a partir del bagazo pre-tratado con 16% de Na₂SO₃ o 8% Na₂SO₃ + 1% de NaOH es similar a la de bajo rendimiento de la pasta química de bagazo. El tiempo de cocción muestra un efecto significativo en el rendimiento de la pasta y longitud de rotura, y ningún efecto sobre los valores de desgarramiento pulpa. (Kokta & Ahmed, 1998)

Tabla 12: Caracterización de pulpas de bagazo de caña obtenidas por *steam explosion*. (Kokta & Ahmed, 1998)

	Pulpa					
	Bagazo	Bagazo	Bagazo	Kenaf	Kenaf	Lino
Pretratamiento Químico						
Na ₂ SO ₃ (%)	16	8	8	8	8	8
NaOH (%)	0	0	1	0	1	0
L/W	4	4	6	3	3	3
Tiempo de cocción (min)	4	4	4	4	4	4
Temperatura de cocción	190	190	190	190	190	190
Longitud de rotura	6.3	3.9	5.8	5.8	8.8	2.4
Brillo (%)	38	40	37	63	55	45
Opacidad (%)	91	96.7	91	94	87	96
Porosidad mL/min	50	460	97	182	5.5	-
Rendimiento (%)	70	81	72	73	67	45

5. MATERIALES, EQUIPOS Y MÉTODOS.

5.1. Materiales

5.1.1. Bagazo de caña

El material lignocelulósico que se utilizará en este trabajo es bagazo de caña recolectado de los puntos de venta de guarapo, ubicados en el sector La bayadera de Medellín.

Se dejará secar a temperatura ambiente y expuesto al sol durante 48 horas aproximadamente. Como se muestra en la figura 10. Este es un residuo de los ingenios azucareros los cuales extraen los jugos de la caña y los procesan para la producción de azúcar.



Figura 10: Bagazo de Caña seco recolectado en Medellín

Una vez seco el bagazo de caña se corta en trozos para un posterior desmedulado, pretratamiento con *steam explosion* y pulpeo alcalino según el diagrama de flujo mostrado en la figura 11, una porción de materia prima es llevada a un molino de cuchillas para obtener muestra malla 40 para su caracterización.

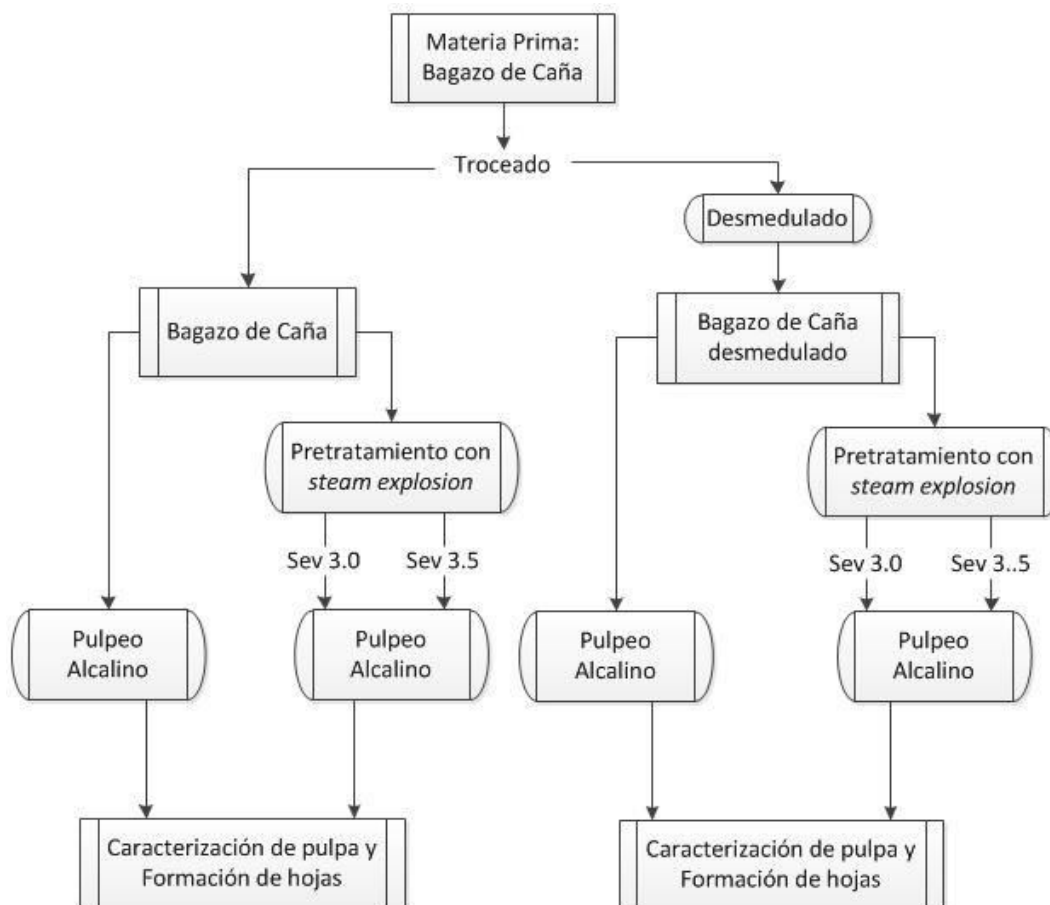


Figura 11: Metodología de pretratamiento con *Steam Explosion* y Pulpeo al Bagazo de Caña.

5.1.2. Hidróxido de sodio (Sosa)

El hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido sódico, también conocido como soda cáustica o sosa cáustica, es un hidróxido cáustico usado en la industria (principalmente como una base química) en la fabricación de papel, tejidos, y detergentes. Además, se utiliza en la industria petrolera en la elaboración de lodos de perforación base agua. A nivel doméstico, son reconocidas sus utilidades para desbloquear tuberías de desagües de cocinas y baños, entre otros.

A temperatura ambiente, el hidróxido de sodio es un sólido blanco cristalino sin olor que absorbe la humedad del aire (higroscópico). Es una sustancia manufacturada. Cuando se disuelve en agua o se neutraliza con un ácido libera una gran cantidad de calor que puede ser suficiente como para encender materiales combustibles. El hidróxido de sodio es muy corrosivo. Generalmente se usa en forma sólida o como una solución de 50%.

5.2. Equipos

5.2.1. Molino

El molino utilizado para el desmedulado de materia prima y para obtener material malla 40 del bagazo de caña, bagazo de caña desmedulado y del material resultante del pretratamiento con *steam explosion*, es un molino de cuchillas marca Restch SM 100, con una malla de clasificación de 425 μm . Mostrado en la figura 12.

El material se alimenta por la tolva ubicada en la parte superior del molino y es recogido en el recipiente inferior del molino.



Figura 12: Molino de cuchillas Restch SM 100

5.2.2. Equipo de *steam explosion*

El equipo para el pretratamiento de bagazo de caña por *steam explosion*, consiste en dos tanques de acero inoxidable, uno sobre el otro. El tanque superior es un reactor cilíndrico dividido en dos compartimientos con aislamiento térmico, uno central de 10L en el cual se adiciona el material a tratar por medio de una válvula y con la ayuda de un embudo, y una sección anular de 5L en la cual se adiciona el agua que se convertirá en vapor utilizando el calor suministrado por las resistencias, el tanque está construido de tal manera que las fibras no se encuentren en contacto con el agua solo hasta estar en condiciones de saturación. El recipiente inferior está unido mediante una electroválvula de accionamiento a

distancia, tiene una capacidad de 100L y es donde se lleva a cabo la expansión súbita del material y su recolección.



Figura 13: Equipo de *Steam Explosion*

5.3. Métodos

5.3.1. Troceado y Desmedulado

Una vez se obtiene el bagazo de caña seco se trocea manualmente con la ayuda de cuchillas y tijeras, formando astillas para facilitar su manejo y alimentación a los equipos de tratamiento.

El proceso de desmedulado cuyo objetivo es aumentar el contenido de fibra para así obtener pulpas de mejor calidad. Se realiza en el molino de cuchillas marca Restch SM 100, donde se alimenta el material troceado por la tolva del molino y se recolecta en su recipiente inferior, posteriormente se pasa el material por un tamiz malla No 8 para separar la médula de la fibra.

5.3.2. Pretratamiento con *steam explosion*

La etapa de pretratamiento con *steam explosion* al bagazo de caña y bagazo de caña desmedulado a diferentes severidades, consiste en los siguientes pasos:

1. Preparar el equipo, encender los interruptores de calentamiento de las resistencias y accionamiento de la electroválvula, y abrir el paso de aire al equipo.
2. Para el lavado del reactor, adicionar 1000mL de agua por la válvula lateral.
3. Cerrar la válvula de alimentación y el tanque de expansión, esperar hasta un aumento en la presión del sistema de 5bar y realizar expansiones sucesivas hasta una presión menor de 0,5bar en el reactor.
4. Abrir la válvula de alimentación y el tanque de expansión para su limpieza.
5. Adicionar 200g del material a tratar por la tubería superior del equipo y con la ayuda del embudo de alimentación y una vara metálica o de madera. El material debe alimentarse lentamente para evitar su atascamiento.
6. Adicionar al equipo 2000mL de agua por la válvula lateral y cerrar, cerrar igualmente la válvula de alimentación y el tanque de expansión.
7. Una vez alcanzada la severidad, la cual varía entre 3.0 y 4.0 con aumento en la presión entre 100 y 180psi, y temperaturas que van desde 170 hasta 190°C, se acciona la electroválvula para interrumpir el proceso y realizar la expansión súbita del material. se realizan expansiones sucesivas hasta alcanzar una presión de 0.5bar en el reactor, para luego abrir la válvula de alimentación y el tanque de expansión.
8. Se recoge el material tratado y se lava con agua corriente. Se exprime y se deja secando a temperatura ambiente.

5.3.3. Pulpeo Alcalino

Se realiza Pulpeo alcalino al bagazo de caña desmedulado, al bagazo de caña pretratado con *steam explosion* desmedulado y sin desmedular. Para ello se toman 180 gramos del material, el 12% de NaOH referido al material en base seca y se considera un hidromódulo de 11.

El proceso de Pulpeo se lleva a cabo en el reactor de *steam explosión*, con una rampa de calentamiento de 50 minutos, donde se aumenta la temperatura hasta 160°C, temperatura objetivo para la cocción de las fibras durante 40 minutos aproximadamente de tratamiento. El control de la temperatura se realiza en modo on-off, con un accionamiento del interruptor cada 5 minutos una vez alcanzada la temperatura de cocción.

La cocción termina una vez se alcanzan 400 unidades del Factor H, teóricamente expresado en la ecuación (2)

$$H = \int_0^T e^{43.33 - \frac{16161.62}{T}} dT$$

Bajo el cálculo de la temperatura hallado con la siguiente correlación:

$$T = a.P^6 + b.P^5 + c.P^4 + d.P^3 + e.P^2 + f.P + g.P \quad (3)$$

Donde:

T = Temperatura (°C)

D = 0.00038885

P = Presión

E = -0.03329043

A = -1.2065E-11

F = 1.99831497

B = 8.825E-09

G = 95.099581

C = -2.58E-06

5.3.4. Formación de hojas

Para evaluar las propiedades de las hojas de pulpa, es necesario preparar o formar una hoja, según la norma Tappi T-205. El formador de hojas se muestra en la figura 14.

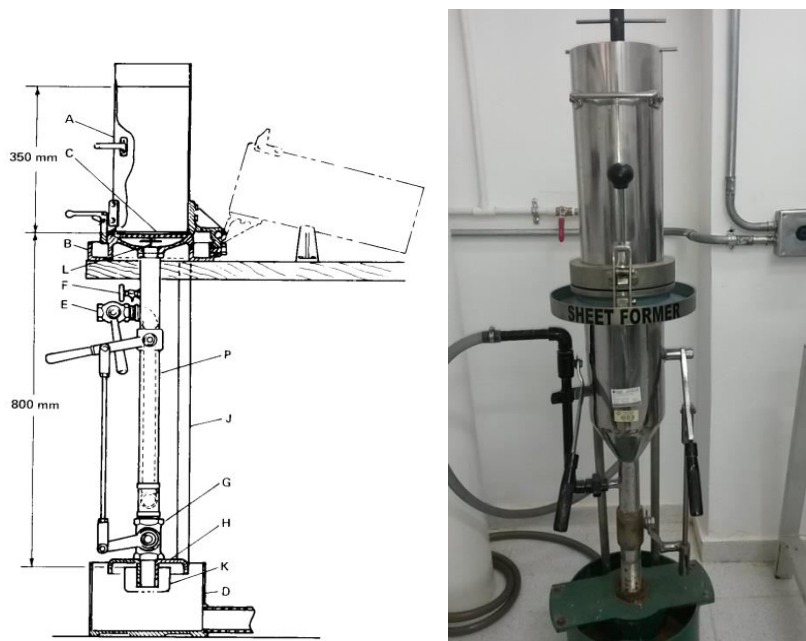


Figura 14: Formador de Hojas

5.3.5. Caracterización

Se caracterizó el bagazo de caña desmedulado, cuantificando: humedad (ASTM E 871-82), porcentaje de cenizas (TAPPI T-211-om-93) (Tappi, 2002), extraíbles orgánicos (TAPPI T-264-om-97), extraíbles acuosos (TAPPI T-207-om-93) y lignina Klason (TAPPI T-207-om-88).

Se caracterizó la pulpa de bagazo de caña mediante los resultados del *freeness* (TAPPI T- 227-om-04) y la lignina Klason (TAPPI T-207-om-88).

La calidad de la pulpa se determina mediante la caracterización de las propiedades de las hojas formadas, bajo las propiedades de calibre, el cual se determina con un micrómetro como la distancia perpendicular entre 2 superficies paralelas, planas y circulares con diámetro aproximado de 16cm, gramaje determinado siguiendo la norma TAPPI T-410 y resistencia al dobléz siguiendo la norma TAPPI T-423.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.2 Caracterización química.

Una vez se recolecta el bagazo de caña y se tiene seco, se procede a un troceado de manera manual, formando astillas para la fácil alimentación de los equipos de tratamiento. Las astillas se muestran en la figura 15.



Figura 15: Astillas de Bagazo integral

Una muestra del material formado en astillas se muele en el molino de cuchillas Restch SM 100, con la malla de clasificación de 4 mm, para ser caracterizado. Al molerse se aumenta el área superficial del material y permite la selección de una muestra representativa de este.

En la figura 16 se muestra el material luego de la molienda.



Figura 16: Bagazo integral malla 40

La caracterización del material comienza con la determinación de la humedad según la norma ASTM E 871-82, siguiendo con la determinación de extraíbles, donde el aumento del área superficial facilita la solubilidad de los compuestos

orgánicos y acuosos en sus respectivos solventes, y se procede según los métodos TAPPI T-264-om-97 y TAPPI T-207-om-93 respectivamente.

Se determina también el contenido de lignina Klason siguiendo el método TAPPI T-207-om-88 y el contenido de cenizas como lo dice la norma TAPPI T-211-om-93, obteniendo para la materia prima los resultados que se muestran en la tabla 13, los cuales se consideran razonables ya que se acercan mucho a lo reportado por Pitarelo en la tabla 1 y teniendo en cuenta que esta composición varía de acuerdo con muchos factores tales como lugar y época de cultivo, entre otros (Larissa, y otros, 2012).

Tabla 13: Caracterización de Materia Prima

Extraíbles Orgánicos*	21,19%
Extraíbles Acuoso*	5,73%
Lignina Klason*	31,73%
Cenizas*	1,10%
Holocelulosas*	40,25%
Contenido de médula	30,73%

* Porcentajes en base seca

6.2 Efecto del *steam explosion* en la composición fisicoquímica

Con el objetivo de conocer el efecto del *steam explosion* en la composición fisicoquímica de las fibras, se lleva a pretratamiento 180g de astillas de bagazo de caña y siguiendo los pasos descritos en la metodología, se realizan ensayos de pretratamiento con *steam explosion* a severidades de 3.0, 3.5, 3.8 y 4.0.

El material resultante es en general oscuro por la cocción de los azúcares y compuestos orgánicos, es una masa fibrosa en forma de lodo y se nota el aumento de la severidad del pretratamiento según la apariencia de degradabilidad de este. Muestras del material pretratado se enseñan en las figuras 17 a 20.



Figura 17: Bagazo pretratado a severidad 3.0



Figura 18: Bagazo pretratado a severidad 3.5



Figura 19: Bagazo pretratado a severidad 3.8



Figura 20: Bagazo pretratado a severidad 4.0

Para conocer el rendimiento del tratamiento, se toma una muestra del material y se determina su humedad, relacionándola con el peso húmedo y obtener el peso seco resultante, para ser comparado con el peso seco alimentado al equipo. Los resultados se muestran en la tabla 14 junto con las condiciones de operación del equipo para cada severidad.

Aunque se encontró reportado en el estudio de Amore una temperatura final para el pretratamiento de aproximadamente 200°C y se menciona la eficacia del tratamiento con SE sobre las fibras (Amore, Ballesteros, Manzanares, Sáez, Michelena, & Ballesteros, 2013), se consideraron temperaturas inferiores reportadas por Kaar y otros ya que en dicho trabajo hacen referencia a recuperaciones de material tratado superiores al 70% (Kaar, Gutierrez, & Kinoshita, 1998); sin embargo, el mayor rendimiento alcanzado en los ensayos preliminares realizados fue del 61% aproximadamente que correspondió al pretratamiento a severidad 3.0.

Tabla 14: Condiciones de operación y rendimiento del tratamiento con *steam explosion*

Severidad	Tiempo (min)	Temperatura final (°C)	Presión (psig)	Rendimiento (%)
3,050	22	173,024	111	61,058
3,528	34	184,239	148	48,554
3,812	41,5	190,376	171	46,820
4,008	62	192,775	180	49,679

La caracterización del material resultante permite conocer el efecto del pretratamiento con *steam explosion* sobre los componentes del bagazo de caña, esta caracterización se hace siguiendo las normas descritas en la metodología, las mismas con las cuales se caracterizó la materia prima.

La caracterización del material tratado con *steam explosion* es base para determinar las condiciones de operación a utilizar en el presente trabajo. Los resultados se muestran en la tabla 15, en la cual se puede observar como aumenta el porcentaje de extraíbles orgánicos y de lignina Klason a medida que aumenta la severidad aplicada en el pretratamiento, mientras que el porcentaje de extraíbles acuosos y holocelulosas disminuye en las mismas condiciones. Adicionalmente se puede observar que a medida que aumenta la severidad hay una tendencia a la disminución en el rendimiento del pretratamiento, lo que significa menor cantidad de fibra útil recuperada después del mismo. Cabe anotar que para severidades mayores a 3,5 el rendimiento tiende a volverse casi constante.

Comparando las masas de las muestras se encuentra que entre el material sin tratamiento y el bagazo pretratado a severidad de 4, se pierde solo un 24,56% de lignina contra una pérdida de masa de holocelulosa de 70.19%.

Tabla 15: Caracterización de bagazo de cañal sometido a *steam explosion*

Material	Bagazo des-medulado	Bagazo integral	Bagazo integral	Bagazo integral	Bagazo integral	Bagazo integral
Severidad	0	0	3	3,5	3,8	4
Humedad (%)	7,64	9,86	8,88	8,45	6,45	8,67
Extraíbles Orgánicos (%)*	15,58	21,19	4,77	8,93	14,77	18,00
Extraíbles Acuosaos (%)*	12,22	5,73	5,41	3,59	2,94	2,37
Lignina Klason (%)*	11,44	31,73	39,41	44,94	45,21	45,76
Holocelulosas (%)*	60,76	40,25	50,41	42,55	37,09	33,87
Rendimiento (%)	100	100	66,37	54,09	53,65	51,78

* Porcentajes en base seca

Para ir acotando las condiciones de operación también se tuvo en cuenta lo reportado por Richard y Dágostino en su artículo para ensayos similares (Richard & D'Agostino, 2000).

En la figura 21 se observa el comportamiento de las diferentes propiedades de acuerdo a la severidad aplicada en el tratamiento.

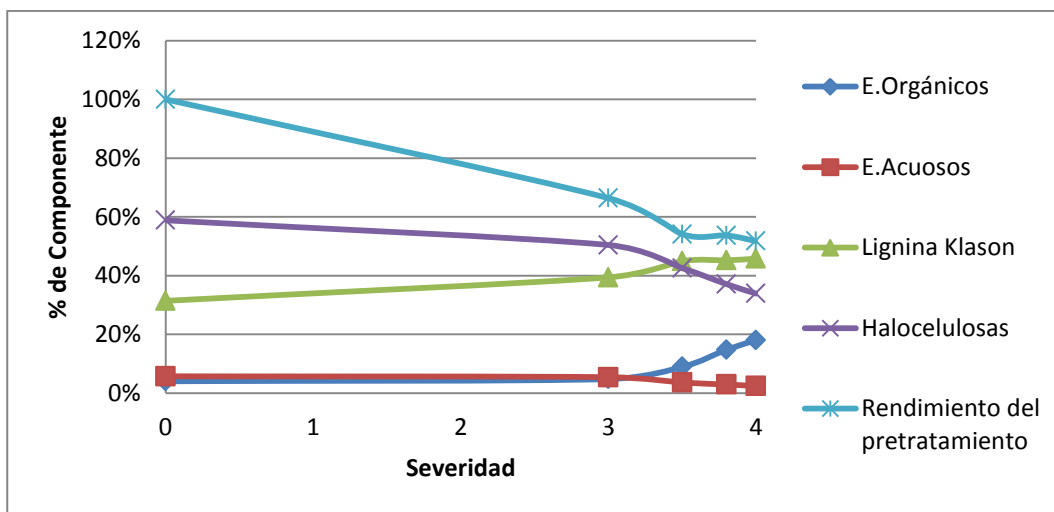


Figura 21: Comportamiento de las propiedades del bagazo respecto a la severidad

6.4 Pulpeos preliminares

Con base en los resultados preliminares se seleccionaron las condiciones de pretratamiento a severidad 3.0 y 3.5, teniendo en cuenta un buen rendimiento y que las fibras no sufren mayor daño, además de ser condiciones utilizadas con frecuencia en ensayos ya mencionados en este trabajo.

Adicionalmente, se puede observar como a medida que se incrementa la severidad en el pretratamiento hay una disminución en las holocelulosas, por lo que no es conveniente utilizar condiciones muy severas.

Una vez definidas las condiciones de operación se procedió con el tratamiento del material y su respectiva caracterización, los resultados se muestran en la tabla 16 donde se observa que el contenido de lignina en el material desmedulado es menor que en el bagazo integral, lo cual se relaciona con la apertura en las fibras que genera el tratamiento en el *steam explosion* que deja más expuesta la lignina y debilita ligeramente sus enlaces (Aguilar Rivera, 2011).

Por otro lado, el rendimiento en los dos materiales decae a medida que aumenta la severidad del pretratamiento, sin embargo la recuperación de fibra útil es mayor en el bagazo desmedulado. Lo anterior se considera aceptable debido a que es cercano a lo reportado en la tabla 11 por Khristova y otros autores, así como los valores de la caracterización del material desmedulado los cuales son similares a los obtenidos por dichos autores en el estudio que realizaron en condiciones similares (Khristova, Kordsachia, Patt, Karar, & Khider., 2006).

Tabla 16: Caracterización del material pretratado obtenido para posterior pulpeo

Material	Bagazo integral			Bagazo desmedulado		
Severidad del pretratamiento	0	3	3,5	0	3	3,5
Humedad (%)	15,20	8,88	8,45	7,64	5,52	6,76
Extraíbles Orgánicos (%)	4,03	4,77	8,93	15,58	4,99	8,77
Extraíbles Acuosa (%)	5,73	5,41	3,59	12,22	3,98	2,57
Lignina Klason (%)	31,41	39,41	44,94	11,44	22,88	24,83
Holocelulosas (%)	58,83	50,41	42,55	60,76	68,14	63,83
Rendimiento del pretratamiento (%)	100	66,37	54,09	100	68,64	56,96

Se realizaron dos ensayos preliminares para determinar las condiciones de operación que permitieran obtener pulpas con las características deseadas. En la tabla 17 se muestran los resultados.

Con base en los resultados obtenidos se determinaron como condiciones de operación las correspondientes al ensayo 2, aunque el rendimiento haya sido menor se consideró principalmente el *freeness* debido a que se busca obtener pulpas con un valor cercano a los 600ml ya que es un valor típico para producción de papel (Aguilar Rivera, 2011) .

Tabla 17: Caracterización pulpeos preliminares

	Ensayo 1	Ensayo 2	
Lignina Klason (%)	39,41	39,41	<u>Características de la materia prima</u>
<i>Freeness</i> (ml)	670	670	
Temperatura final (°C)	161,08	161,08	
Tiempo (min)	65	40	
Factor H	543,37	370,70	
Material resultante seco (g)	71,2	63,8	
Material incocado (%)	3,25	2,37	Características de la pulpa
Rendimiento (%)	46,52	39,86	
<i>Freeness</i> (ml)	413,75	500	
Lignina Klason (%)	5,15	9,42	
Rendimiento (%)	46,52	39,86	
Factor H	543,37	370,67	

NaOH referido al material en base seca = 12%, hidromódulo= 11

6.5 Pulpeos finales

Una vez se definieron las condiciones de operación mediante los datos de la tabla 17, se procedió a fabricar las pulpas a partir de los diferentes materiales (bagazo integral, desmedulado, pretratado y sin pretratar), en las tablas 18 y 19 se muestran las propiedades de las pulpas obtenidas.

Tabla 18: Caracterización de pulpas de bagazo integral

Materia prima de la pulpa	Bagazo integral	Bagazo integral pretratado a S3.0	Bagazo integral pretratado a S3.5
Humedad (%)	13,50	9,47	3,52
Extraíbles Orgánicos (%)	12,30	26,33	13,49
Extraíbles Acuoso (%)	7,72	7,08	4,08
Lignina Klason (%)	10,60	15,41	16,70
Holocelulosas (%)	69,38	51,18	65,72

En las pulpas obtenidas a partir de bagazo integral se observa un menor contenido de extraíbles orgánicos en la de materia prima sin pretratar y en la tratada a severidad 3,5, mientras que el contenido de lignina tuvo un comportamiento inverso, en cuanto a los extraíbles acuoso hay tendencia a disminuir conforme aumenta la severidad aplicada. Por otro lado, el contenido de holocelulosas en el pulpeo fue mayor en la pulpa de materia prima sin pretratar y en la tratada a severidad 3,5 que en la pulpa obtenida a partir de bagazo pretratado a severidad 3,0.

Tabla 19: Caracterización de pulpas de bagazo desmedulado

Materia prima de la pulpa	Bagazo desmedulado	Bagazo desmedulado pretratado a S3.0	Bagazo desmedulado pretratado a S3.5
Humedad (%)	9,66	7,07	4,25
Extraíbles Orgánicos (%)	8,17	10,02	9,89
Extraíbles Acuoso (%)	3,78	2,22	2,86
Lignina Klason (%)	14,64	29,72	41,45
Holocelulosas (%)	63,74	58,05	45,79

En las pulpas obtenidas a partir de bagazo desmedulado el contenido de extraíbles orgánicos fue mayor en la de materia prima pretratada a severidad 3,0 que en las otras dos, mientras que en los extraíbles acuoso hay un menor contenido en la pulpa de materia prima pretratada a severidad 3,0 que en las otras dos. En cuanto a la cantidad de holocelulosas se observa una disminución conforme aumenta la severidad del pretratamiento.

Comparando en general las pulpas obtenidas a partir de bagazo integral frente a las de bagazo demsedulado se observa la misma tendencia a la disminución en el contenido de holocelulosas.

Adicionalmente se midieron otras propiedades de interés para este trabajo las cuales se muestran en las tablas 20 y 21.

Tabla 20: Propiedades de la materia prima de las pulpas

Materia prima de la pulpa	B.I	B.I.P a S3.0	B.I.P a S3.5	B.D	B.D.P a S3.0	B.D.P a S3.5
Lignina Klason (%)	31,41	39,41	44,94	11,44	22,88	24,83
Rendimiento (%)	50,53	46,50	48,37	39,99	38,48	38,77
Freeness (ml)		670	730		740	723,33

B= Bagazo, I= Integral, D=Desmedulado, P= Pretratado, S= Severidad

Tabla 21: Propiedades de las pulpas

Materia prima de la pulpa	B.I	B.I.P a S3.0	B.I.P a S3.5	B.D	B.D.P a S3.0	B.D.P a S3.5
Temperatura final (°C)	161,08	161,08	161,08	161,08	161,08	161,08
Tiempo (min)	40	40	40	40	36	36
Material incocido (%)	19,88	21,83	3,33	21,67	0,74	0,348
Factor H	369,06	370,70	379,94	377,74	385,14	377,78
Rendimiento (%)	80,12	82,08	96,67	78,33	99,26	99,65
Freeness (ml)	740	670	746,67	696,67	686,67	730

B= Bagazo, I= Integral, D=Desmedulado, P= Pretratado, S= Severidad

Los resultados anteriores son congruentes con lo que postula Sanjuán sobre la posibilidad de obtener pulpas de buen rendimiento a partir de bagazo desmedulado bajo las condiciones óptimas de pulpeo (Sanjuán Dueñas, Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel, 1997), esto teniendo en cuenta que los rendimientos obtenidos en este estudio son superiores a los valores entre 40 y 55% reportados por el mismo autor en 2003 (Sanjuán Dueñas, Proceso de fabricación de pulpas, 2003).

Por otro lado el rendimiento obtenido en las pulpas fabricadas a partir de material pretatado con *steam explosion* es en promedio del 90%, el cual superior con respecto a lo reportado por Kokta para pulpas hechas a partir de material lignocelulósico pretatado químicamente, donde el rendimiento promedio obtenido es del 74% (Kokta & Ahmed, 1998).

Dentro de las pulpas obtenidas a partir de bagazo integral es notable el bajo contenido de incocidos de la pulpa pretatada a severidad 3,5 con respecto a las otras dos pulpas, además de su alto rendimiento; en lo anterior se puede observar como el efecto del desmedulado favorece el transporte de reactivos hacia las fibras y permite mayor cocción del material lignocelulósico. En cuanto al contenido de lignina hay similitud entre la pulpa de bagazo pretatado a severidad 3,0 y la de severidad 3,5, mientras que el *freeness* fue similar en esta última y en la de bagazo integral.

En el grupo de pulpas obtenidas a partir de bagazo demedulado el contenido de incocidos decae significativamente con el tramamiento con *steam explosion* respecto a la pulpa que no lo tuvo y el rendimiento aumenta considerablemente al realizarle este procedimiento a la materia prima. En cuanto al *freeness* se observan valores muy cercanos entre sí.

Comparando los dos grupos de pulpas se observan tendencias muy similares en los comportamientos excepto en la lignina. En cuanto a los resultados obtenidos en los respectivos *freeness* se puede pensar en que la longitud de las fibras obtenidas en las diferentes pulpas son de un tamaño aceptable para la producción de papel ya que el valor de esta propiedad aumenta conforme va aumentando el tamaño de la fibra (Aguilar Rivera, 2011).

A partir de las pulpas obtenidas se formaron hojas manuales de acuerdo a lo descrito en la metodología. Los resultados se muestran en las figuras 22 a 27, así como en la tabla 22. En este proceso hubo varias dificultades para formación de las hojas de pulpas obtenidas de bagazo integral, se presentó dificultad para obtener homogeneidad, bordes definidos y gramaje adecuado; mientras que las hojas formadas de pulpas obtenidas a partir de bagazo desmedulado presentaron bordes más definidos, mayor homogeneidad en la distribución del material en el área y mejoró el gramaje.



Figura 22: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo integral



Figura 23: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo integral pretratado a severidad 3.0



Figura 24: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo integral pretratado a severidad 3.5



Figura 25: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo desmedulado



Figura 26: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo desmedulado pretratado a severidad 3.0



Figura 27: Hoja formada a partir de pulpa de bagazo desmedulado pretratado a severidad 3.5

Tabla 22: Características de las hojas formadas manualmente

Material de la hoja	Peso promedio (g)	Área promedio (m ²)	Gramaje promedio (g/m ²)
Pulpa de B.I	1,10	0,02	56,43
Pulpa de B.I.P a S3.0	1,23	0,02	64,09
Pulpa de B.I.P a S3.5	1,10	0,02	58,17
Pulpa de B.D	1,56	0,02	79,51
Pulpa de B.D.P a S3.0	1,24	0,02	62,66
Pulpa de B.D.P a S3.5	1,27	0,02	64,76

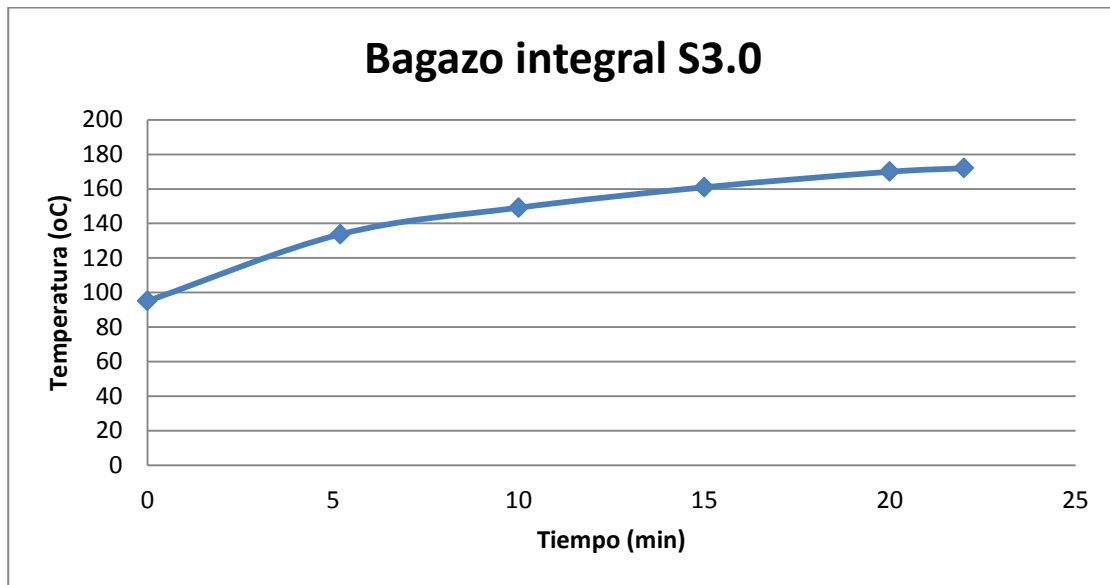
B= Bagazo, I= Integral, D=Desmedulado, P= Pretratado, S= Severidad

7. CONCLUSIONES

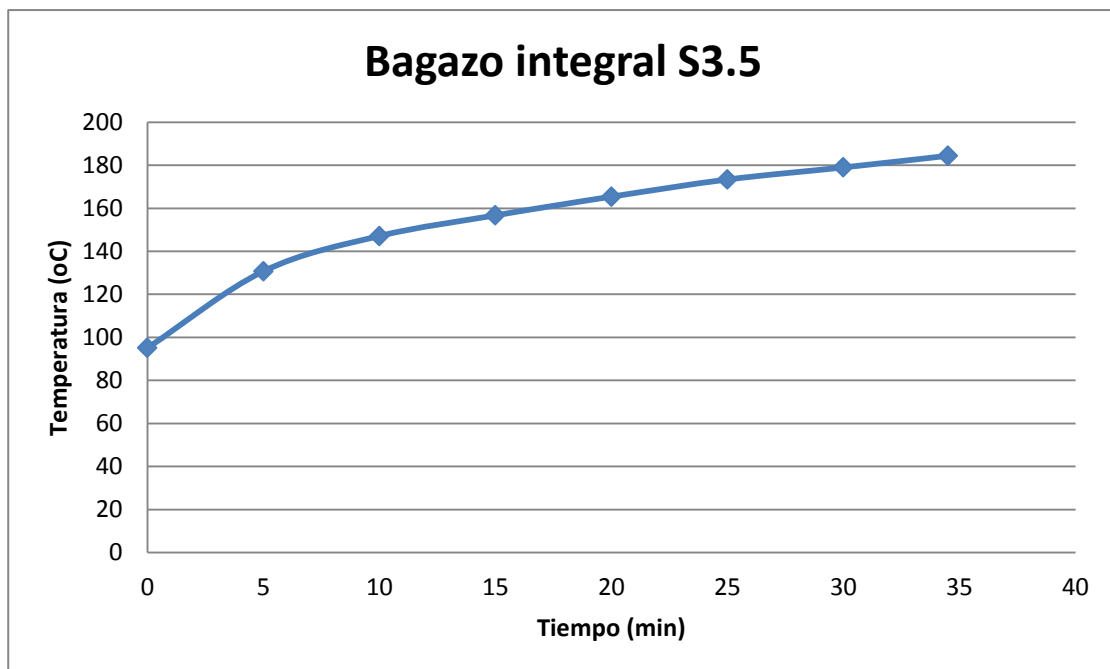
El efecto del *steam explosion* en las propiedades fisicoquímicas de las fibras tanto de la materia prima como de las pulpas se observa principalmente en la disminución de las fracciones de extraíbles acuosos y de holocelulosas en el material pretratado a medida que aumenta la severidad del proceso, esta tendencia es igual para la recuperación de fibra útil posterior a la etapa de pretratamiento de la materia prima; sin embargo, en las pulpas la recuperación de fibra útil se incrementa con el incremento de la severidad. El efecto del *pretratamiento* sobre el desmedulado del bagazo se observa en la disminución de las fracciones de extraíbles orgánicos y acuosos y el incremento de la fracción de holocelulosas en el bagazo desmedulado frente al bagazo integral. Este efecto se evidencia nuevamente en la disminución del contenido de lignina en las pulpas formadas a partir del material desmedulado, ya que se asocia el mayor grado de deslignificación a los cambios generados en las fibras por el pretratamiento y permiten mayor difusión de reactivos gracias a la apertura de las fibras; adicionalmente la fracción de incocidos disminuye en las pulpas producidas a partir de bagazo desmedulado, lo cual sugiere que es posible obtener pulpas de buen rendimiento con menor contenido de álcali usando materia prima desmedulada. Adicionalmente se obtuvieron hojas con menor presencia de fibras incocidas, mayor gramaje y más resistentes con las pulpas a partir de material desmedulado.

ANEXOS

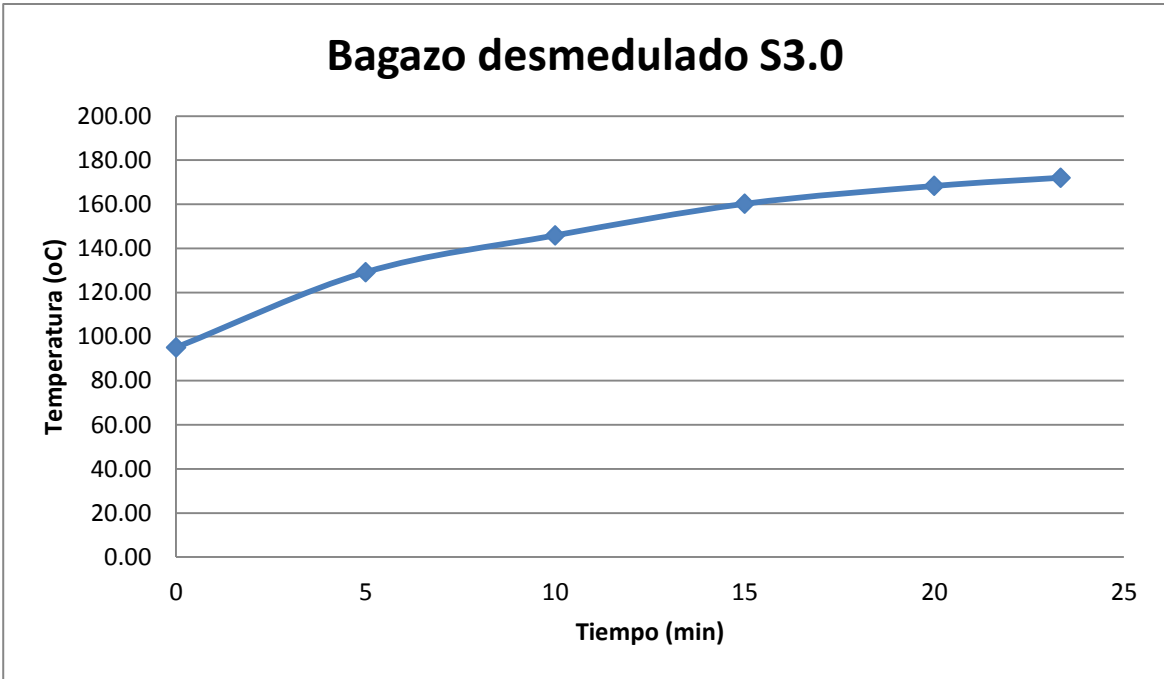
ANEXO 1. Condiciones del tratamiento por *steam explosion*



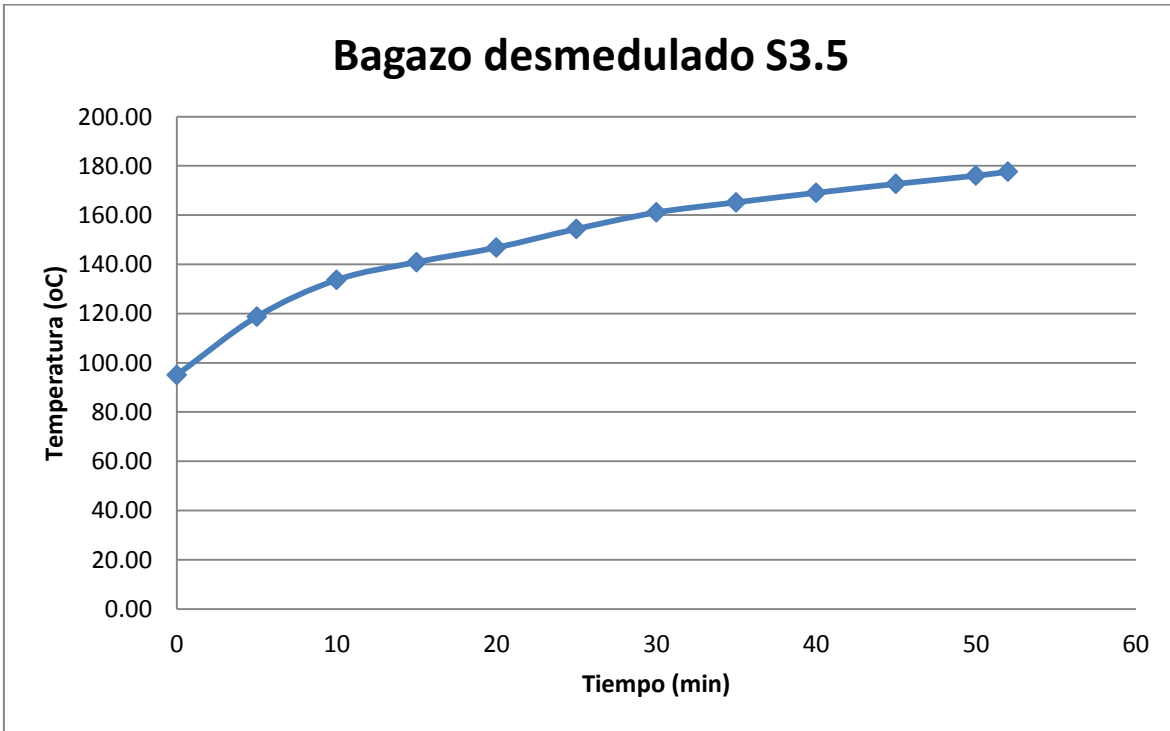
Anexo 1A: Curva de calentamiento del pretratamiento al bagazo integral a severidad 3.0



Anexo 1B: Curva de calentamiento del pretratamiento al bagazo integral a severidad 3.5

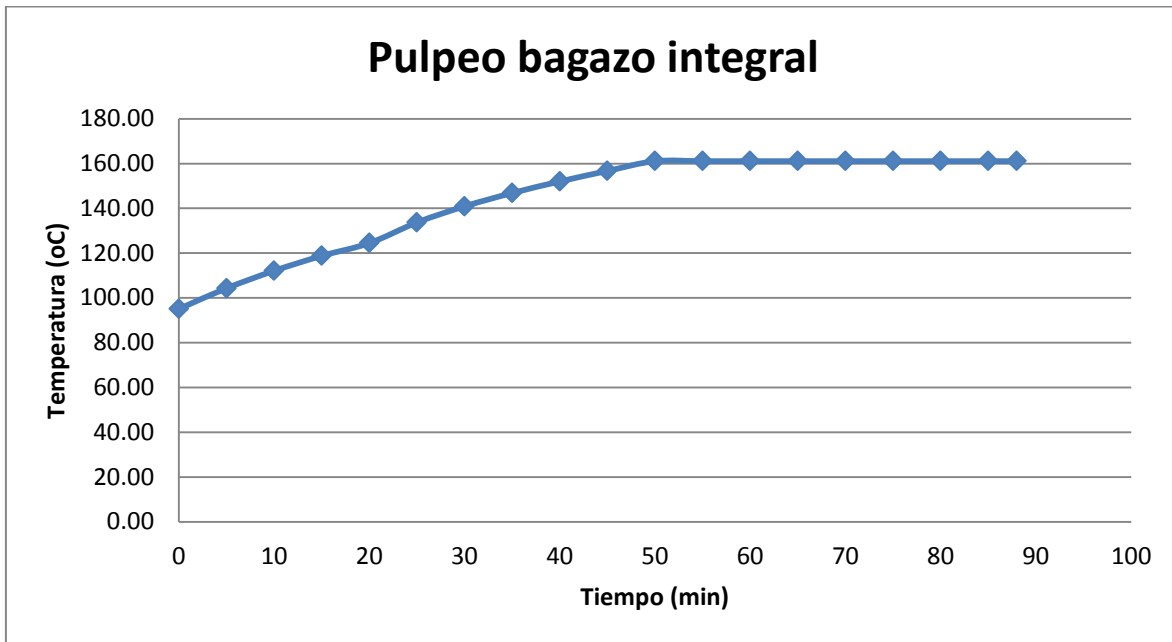


Anexo 1C: Curva de calentamiento del pretratamiento al bagazo desmedulado a severidad 3.0

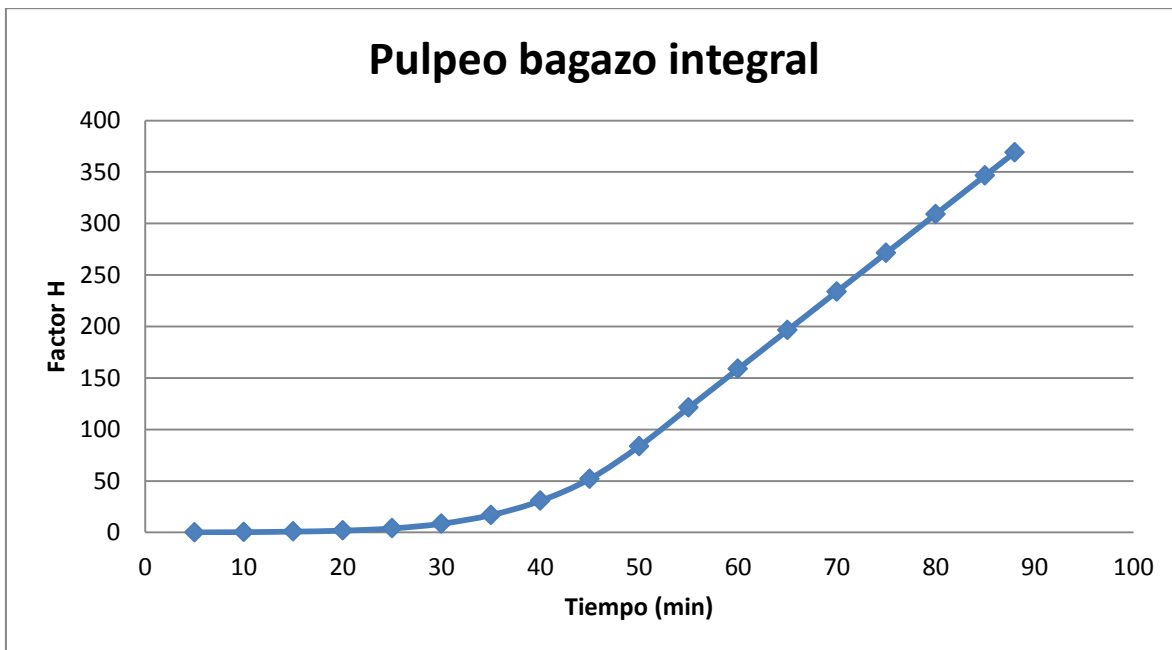


Anexo 1D: Curva de calentamiento del pretratamiento al bagazo desmedulado a severidad 3.5

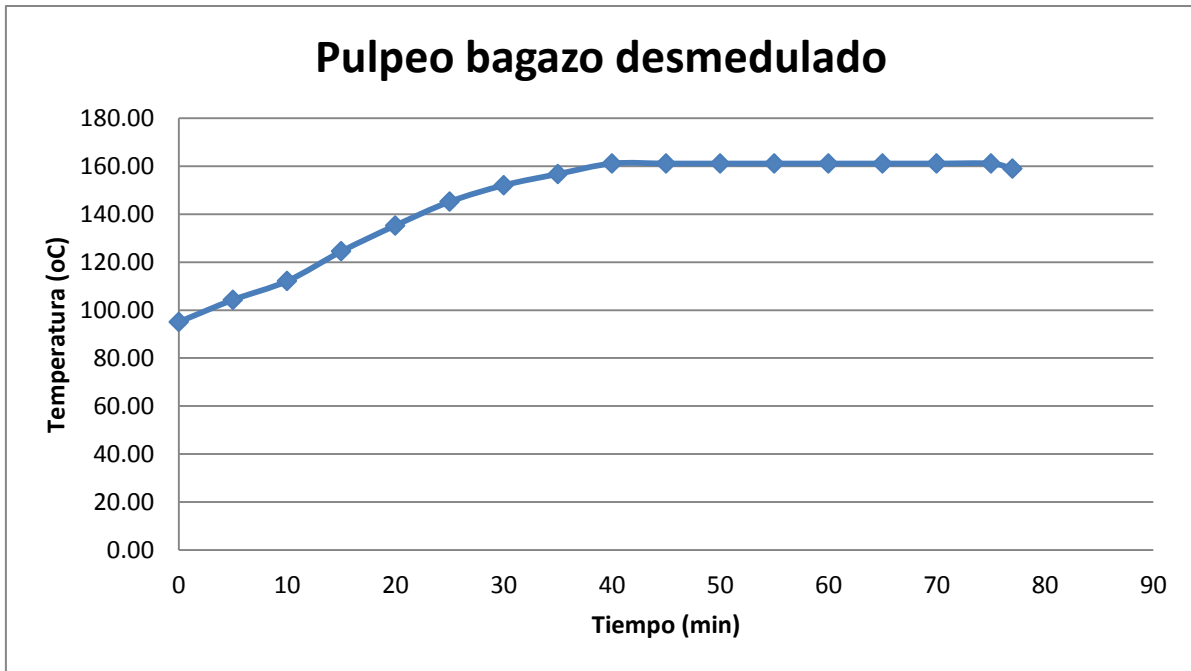
ANEXO 2. Condiciones de proceso de pulpeos preliminares



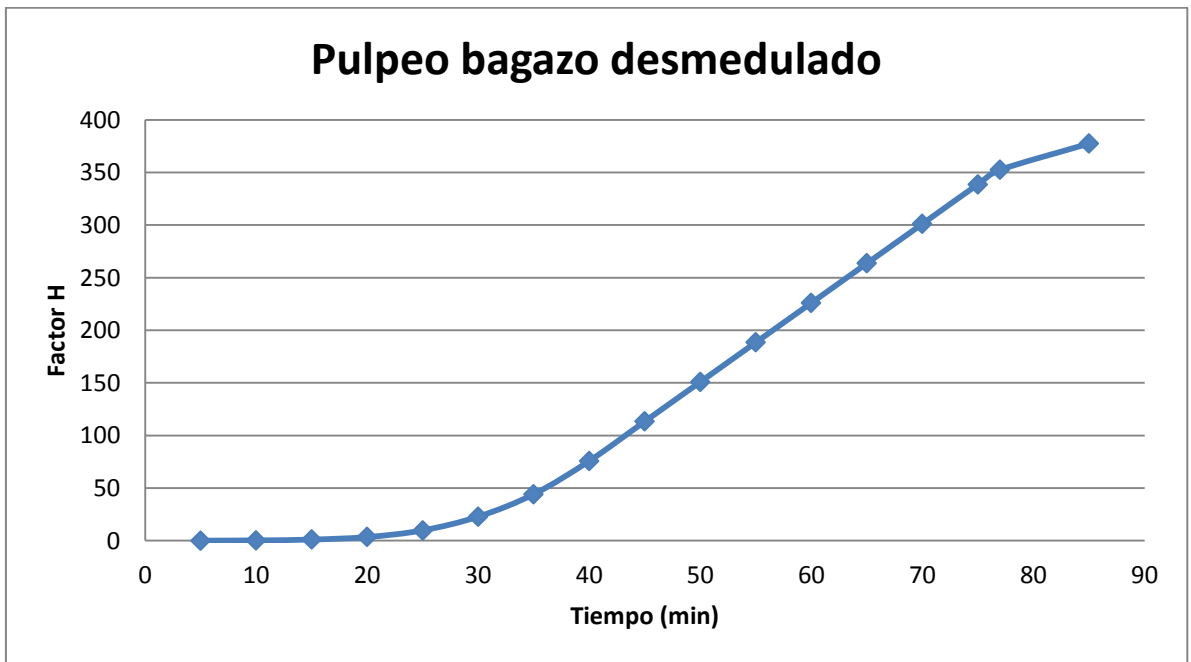
Anexo 2A: Curva de calentamiento del pulpeo con bagazo integral



Anexo 2B: Factor H del pulpeo con bagazo integral

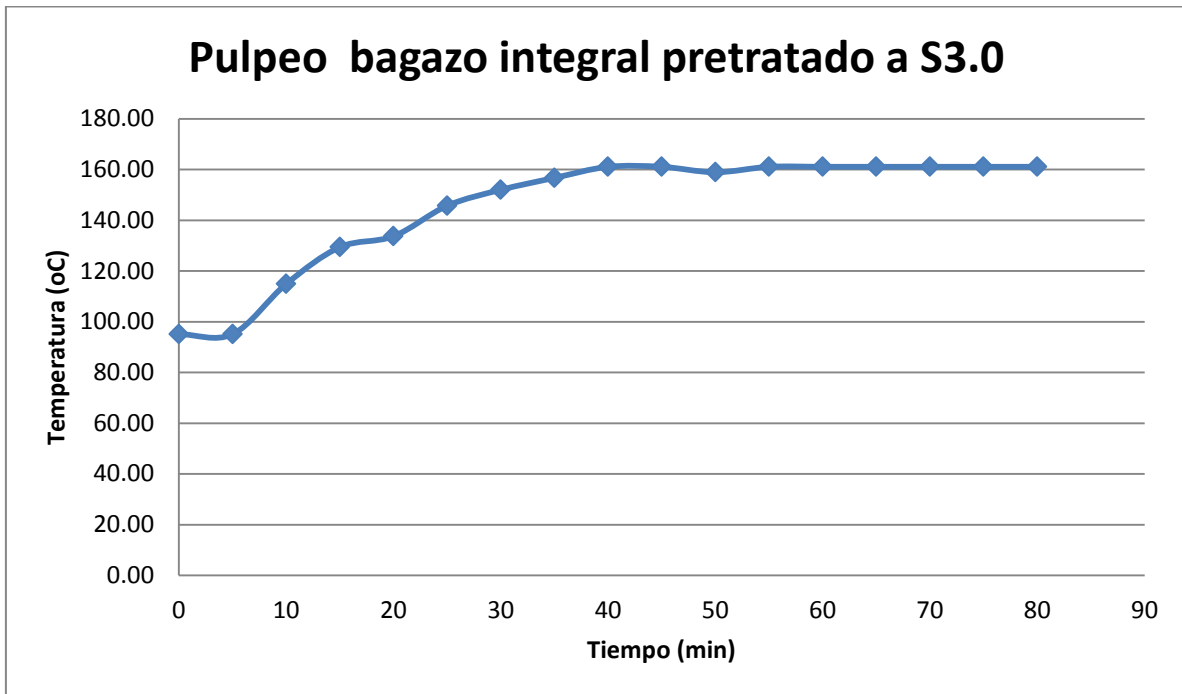


Anexo 2C: Curva de calentamiento del pulpeo con bagazo desmedulado

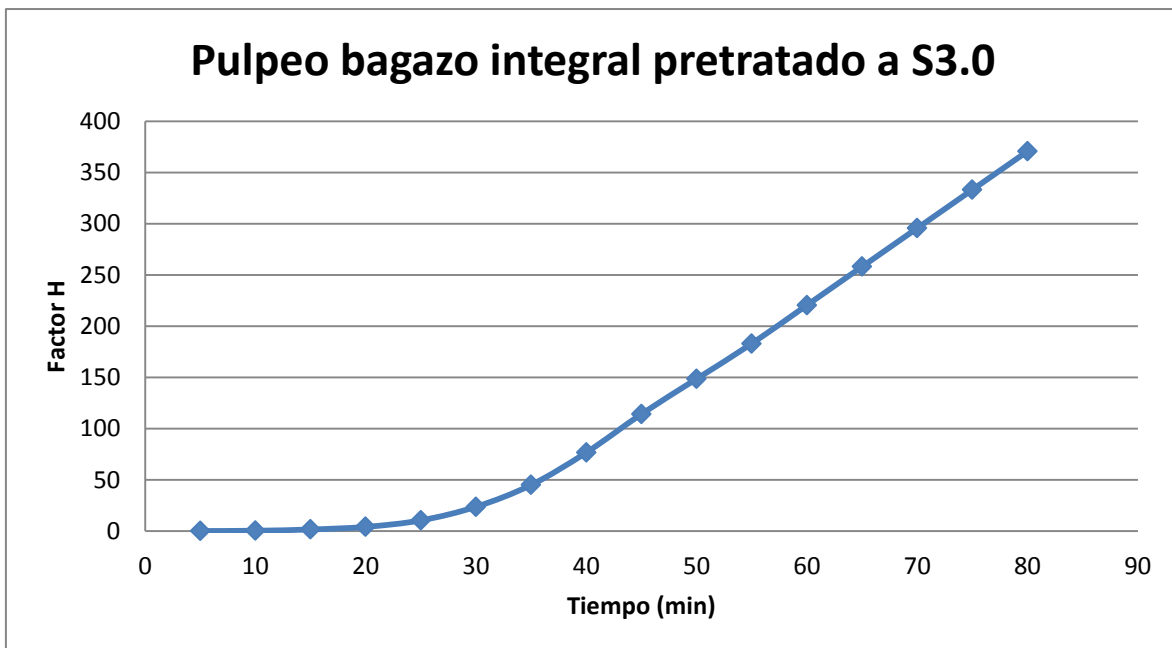


Anexo 2E: Factor H del pulpeo con bagazo desmedulado

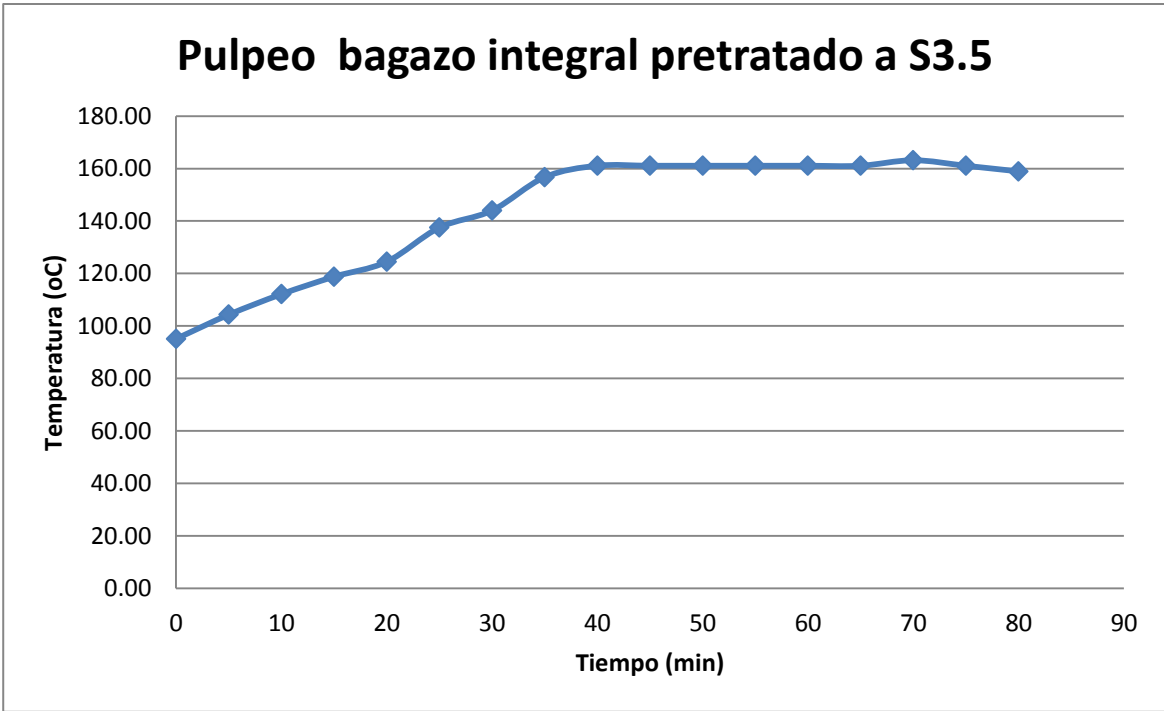
ANEXO 3. Condiciones de proceso del pulpeos preliminares



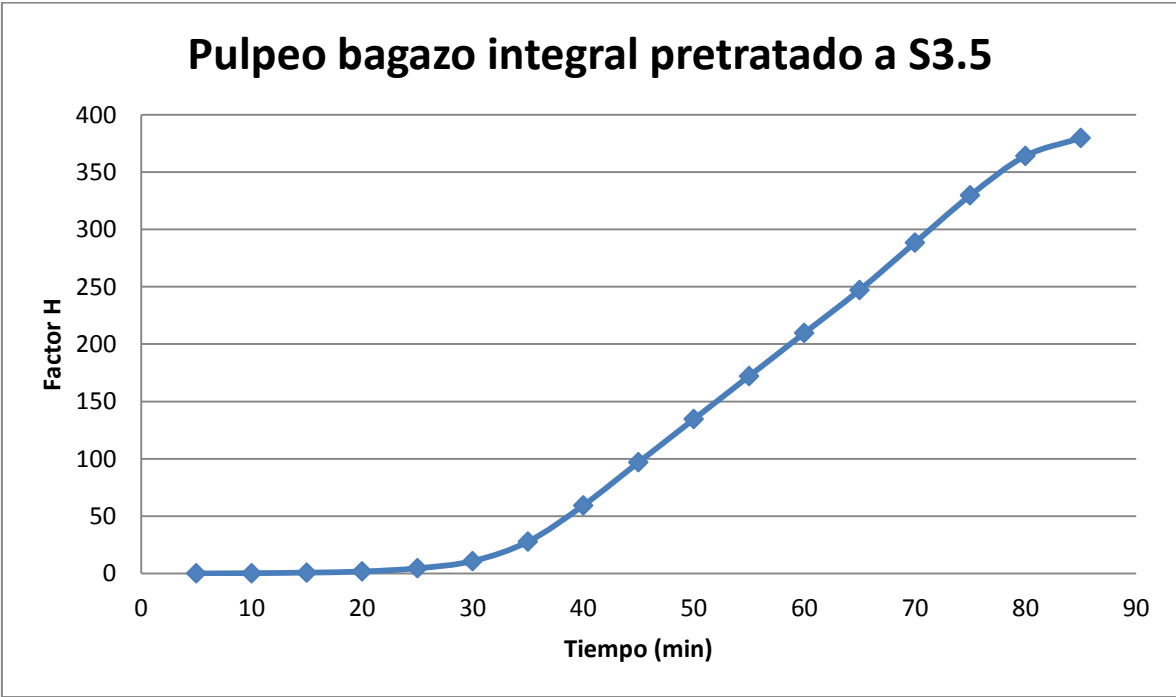
Anexo 3A: Curva de calentamiento del pulpeo con bagazo integral pretratado a S3.0



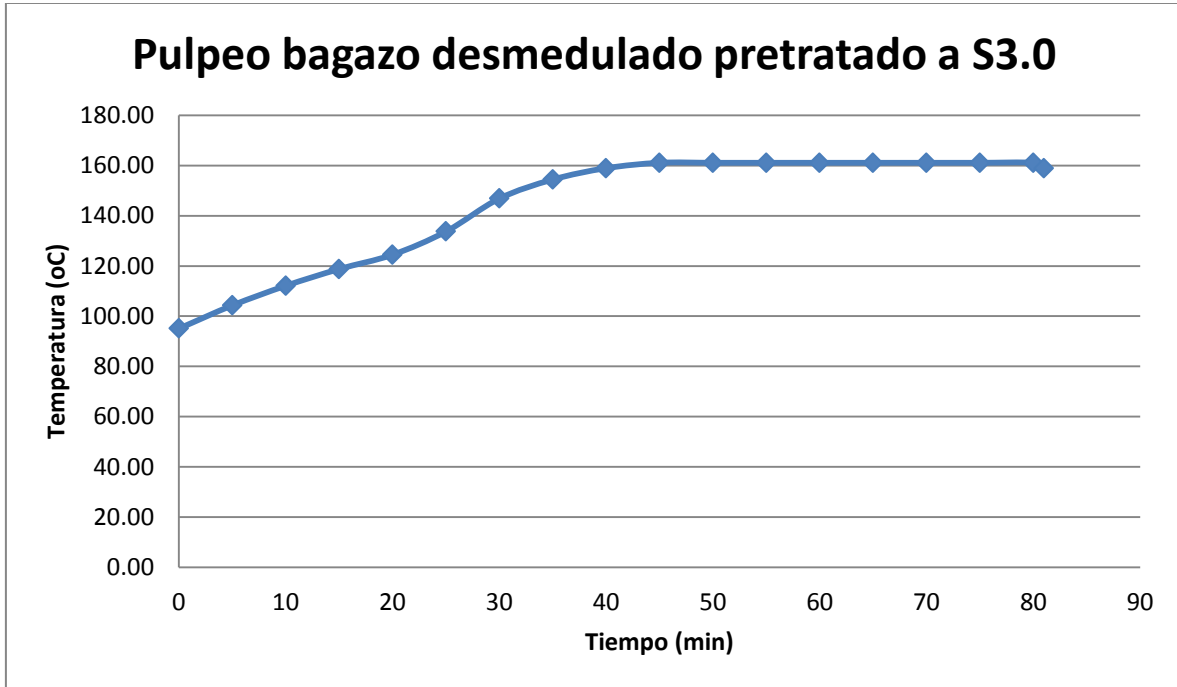
Anexo 3B: Factor H del pulpeo con bagazo integral pretratado a S3.0



Anexo 3C: Curva de calentamiento del pulpeo con bagazo integral pretratado a S3.5



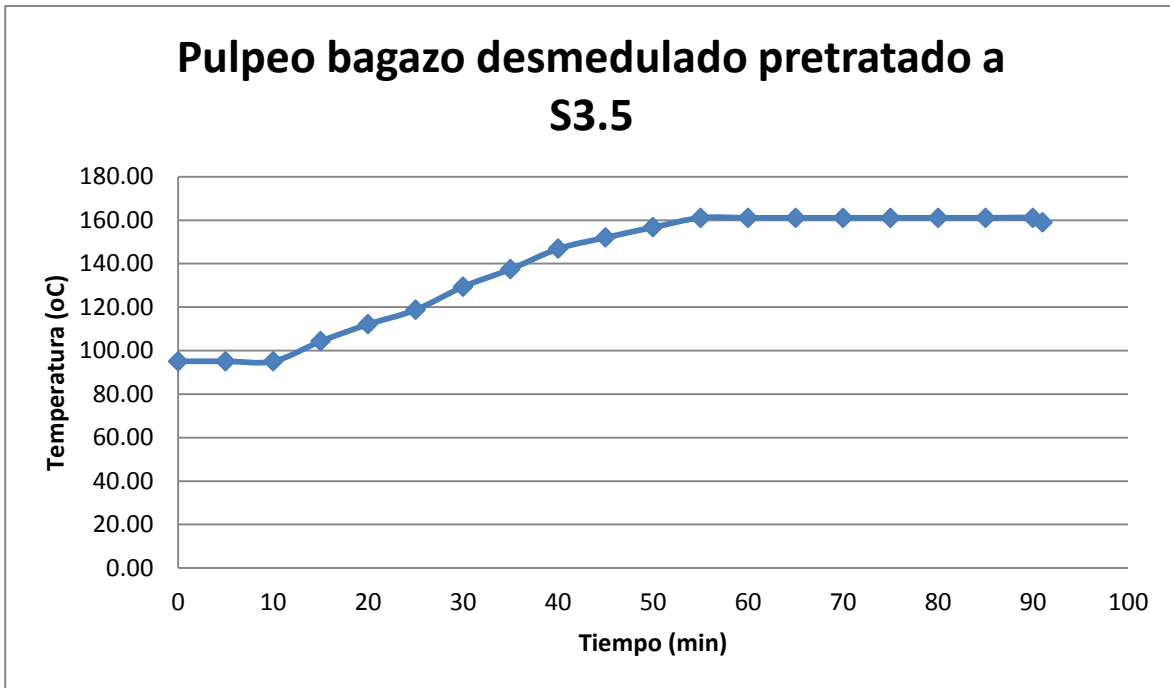
Anexo 3D: Factor H del pulpeo con bagazo integral pretratado a S3.5



Anexo 3E: Curva de calentamiento del pulpeo con bagazo desmedulado pretratado a S3.0



Anexo 3F: Factor H del pulpeo con bagazo desmedulado pretratado a S3.0



Anexo 3G: Curva de calentamiento del pulpeo con bagazo desmedulado pretratado a S3.5



Anexo 3H: Factor H del del pulpeo con bagazo desmedulado pretratado a S3.5

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Rivera, N. (2011). Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de celulosa grado papel. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 189-197.
- Aguilar Rivera, N. (2011). Efecto del almacenamiento de bagazo de caña en las propiedades físicas de la celulosa grado papel. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XII(1), 189-197.
- Aguilar Valencia, D. M. (2011). *Producción de etanol a partir de bagazo de caña panelera mediante un sistema híbrido de fermentación y pervaporación*. Recuperado el 12 de Agosto de 2013, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4443/1/8109501.2011.pdf>
- Amore, I., Ballesteros, I., Manzanares, P., Sáez, F., Michelena, G., & Ballesteros, M. (Abril de 2013). Ethanol Production from Sugarcane Bagasse Pretreated by Steam Explosion. *Electronic Journal of Energy & Environment*, 01(01), 25-36.
- Avellar, B., & Glasser, W. (1998). Steam-assisted biomass fractionation. I. Process considerations and economic evaluation. *Biomass and Bioenergy*, 14(3), 205-218.
- Cempre. (2010). *Cempre*. Recuperado el 04 de 09 de 2013, de <http://www.cempre.org.co/documentos/Ficha%20Papel%20y%20Cart%C3%B3n.pdf>
- Cordeiro, N., Ashori, A., Hamzeh, Y., & Faria, M. (2013). Effects of hot water pre-extraction on surface properties of bagasse soda pulp. *Material Science and Engineering C*, 613-617.
- Delfin Britos, L. J., & Ramírez, G. E. (2007). *PROYECTO DE UNA PLANTA DE PAPEL A PARTIR DEL BAGAZO DE CAÑA*. Asunción: Paraguay.
- Faostat. (2013). *Capacidad producción de pasta y papel*. Recuperado el 04 de 08 de 2013, de <http://www.fao.org/forestry/statistics/81757/es/>
- Greenpeace. (2006). *Plan de producción limpia para la industria del papel*. Buenos Aires, Argentina.
- Harris, R. (2012). Selección de Pretratamientos en Base a Caracterización Físico-Química de Residuos de Eucalyptus Globulus y Populus Canadensis para la Producción de Bioetanol. *Selección de Pretratamientos en Base a Caracterización Físico-Química de Residuos de Eucalyptus Globulus y Populus Canadensis para la Producción de Bioetanol*. Santiago de Chile.
- Jacquet, N., Quiévy, N., Vanderghem, C., Janas, S., Blecker, C., Wathelet, B., y otros. (2011). Influence of steam explosion on the thermal stability of cellulose fibres. *Polymer Degradation and Stability*, 1582-1588.

- Jacquet, N., Quiévy, N., Vanderghem, C., Janas, S., Blecker, C., Wathelet, B., y otros. (2011). Influence of steam explosion on the thermal stability of cellulose fibers. *Polymer Degradation and Stability*, 1582-1588.
- Kaar, W., Gutierrez, C., & Kinoshita, C. (1998). Steam explosion of sugarcane bagasse as a pretreatment for conversion to ethanol. *Biomass and Bioenergy*, 14(3), 277-287.
- Khristova, P., Kordsachia, O., Patt, R., Karar, I., & Khider, T. (2006). Environmentally friendly pulping and bleaching of bagasse. *Industrial Crops and Products*, 23, 131-139.
- Kokta, B. V., & Ahmed, A. (1998). *Environmentally friendly technologies for the pulp and paper industry, Cap 6 Steam Explosion Pulping*. New York, EE.UU: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Larissa, C., Kumar Ch, A., Dos Santos Milessi, T. S., Fernandes Atunes, F. A., Da Costa Freitas, W. L., Almeida, F. M., y otros. (2012). Bioconversion of Sugarcane Biomass into Ethanol: An Overview about Composition, Pretreatment Methods, Detoxification of Hydrolysates, Enzymatic Saccharification, and Ethanol Fermentation. *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, 13.
- Licona Aguilar, A. I. (Mayo de 2013). Obtención de fibra dietética nutricional de valor agregado a partir de bagazo de caña. Universidad Veracruzana.
- MAG Paper de Mexico S.A de C.V. (2014). *MAG Paper de Mexico S.A de C.V.* Recuperado el 02 de Noviembre de 2014, de <http://www.magpaper.com/index.html>
- Propal. (2010). *El Papel de la caña de azúcar*. Recuperado el 06 de 09 de 2013, de <http://www.propal.com.co/>
- Ramos, L. P. (2003). THE CHEMISTRY INVOLVED IN THE STEAM TREATMENT OF LIGNOCELLULOSIC MATERIALS. *Química Nova*, 26(6), 863-871.
- Richard, A., & D'Agostino, D. (2000). CONTINUOUS STEAM EXPLOSION PULPING: PROCESS OPTIMIZATION FOR NON-WOODY FIBERS. *Stake Technology Ltd.*
- Richard, A., Davies, C., DuPlooy, A., Kerr, I., & D'Agostino, D. (2001). *STEAM EXPLOSION PULPING OF BAGASSE FOR FINE PAPER PRODUCTION*. Obtenido de <http://independent.academia.edu/Kerrlain>
- Rocha, G., Gonçalves, Oliveira, B., Olivares, E., & Rossel, C. (2012). Steam explosion pretreatment reproduction and alkaline delignification reactions performed on a pilot scale with sugarcane bagasse for bioethanol production. *Industrial Crops and Products*, 274-279.
- Sanjuán Dueñas, R. (1997). *Obtención de pulpas y propiedades de las fibras para papel* (1a ed.). Guadalajara, Jalisco, México: Agata editores, S.A.
- Sanjuán Dueñas, R. (2003). *Proceso de fabricación de pulpas*. Guadalajara, Mexico: Cenpapel.

- TAPPI. (1997). *Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board T 411 om-97*.
Obtenido de <http://www.tappi.org/Bookstore/Standards-TIPs/Standards/Paper-and-Paperboard/Thickness-of-Paper-and-Paperboard-Soft-Platen-Method-Test-Method-T-551-om-06.aspx>
- TAPPI. (1998). Obtenido de <http://grayhall.co.uk/BeloitResearch/tappi/t414.pdf>
- TAPPI. (1999). Obtenido de <http://research.cnr.ncsu.edu/wpsanalytical/documents/T227.PDF>
- Tappi. (2002). Forming handsheets for physical tests of pulp. Recuperado el 22 de Marzo de 2014,
de <http://research.cnr.ncsu.edu/wpsanalytical/documents/T205.PDF>
- TAPPI. (2002). Obtenido de <http://www.tappi.org/>
- TAPPI. (2013). *Bending resistance of paper and paperboard* . Obtenido de
<http://www.tappi.org/content/tag/sarg/t489.pdf>
- TAPPI. (2013). *Grammage of paper and paperboard* . Obtenido de
<http://www.tappi.org/content/tag/sarg/t410.pdf>
- Wang, K., Chen, J., Sun, S., & Sun, R. (2015). Chapter 6. Steam Explosion.