



**UNIVERSIDAD NACIONAL
“PEDRO RUIZ GALLO”
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**



TESIS

**“DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SODA
CÁUSTICA, TIEMPO DE COCCIÓN Y TAMAÑO DE
PARTÍCULA, EN LA OBTENCIÓN DE PULPA PARA LA
FABRICACIÓN DE PAPEL A PARTIR DE LAS HOJAS DE
CAÑA DE AZÚCAR”**

**PARA OBTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADA POR:

- Bach.: Delgado Espinoza Celine Emperatriz**
- Bach.: Uribe Torres Diego Alonso**

Lambayeque – Perú

2017

**“DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SODA CÁUSTICA,
TIEMPO DE COCCIÓN Y TAMAÑO DE PARTÍCULA, EN LA OBTENCIÓN
DE PULPA PARA LA FABRICACIÓN DE PAPEL A PARTIR DE LAS
HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR”**

Bach. Delgado Espinoza Celine Emperatriz

Autor

Bach. Uribe Torres Diego Alonso

Autor

Aprobada por:

M.Sc. Hernández Oré José Enrique
Jurado Presidente

M.Sc. Ángeles Chero Pedro Pablo
Jurado Secretario

M.Sc. Robles Ruiz Juan Francisco
Jurado Vocal

M.Sc. Arce Cruzado Carlos Reinerio
Asesor

DEDICATORIA

A mis padres:

Carmen Rosa Espinoza Lucano y

Luis Bernardo Delgado Guevara

A la memoria de mi abuelo:

Juan Crisóstomo Espinoza Ramirez

Celine Emperatriz Delgado Espinoza

A mis nonnos:

Adela Carrasco de Torres y

Jaime Torres Wong

A mis padres:

Arianna Torres Carrasco y

Ricardo Armando Uribe Llanos

Diego Alonso Uribe Torres

AGRADECIMIENTOS

A Dios todo poderoso por permitirme llegar a este momento, por darme la oportunidad de contar con salud y energía todos los días, por darme la fuerza, el ánimo, LA VIDA.

A mis padres Carmen y Luis, por su esfuerzo y dedicación para que pueda cumplir con mi meta, por apoyarme tanto tiempo sin condiciones ni límites, por guiarme en este y muchos caminos que la vida tuvo para mí, por querer que siempre busque lo mejor y que lo haga de la forma correcta. Mi gratitud y amor más grande es todo el esfuerzo puesto en este proyecto y los principales responsables que este trabajo se haya plasmado son ellos porque sin ellos no soy nada.

A mis abuelos Hortencia y Eugenio por su amor y apoyo incondicional, por ser mis segundos padres, porque sin su preocupación y ocupación por mí no fuera lo que hoy soy, porque en cada paso estuvieron ahí para alentarme, porque los amo y lo que hice, haga o haré siempre será en su nombre.

A mi tío Victor, por el interés en mí y en mi crecimiento como profesional, por sus consejos y apoyo en todo momento.

Ya todos los que me tendieron una mano en este camino.

Gracias.

Celine Emperatriz Delgado Espinoza

A Dios por haberme dado su bendición y salud para culminar este proyecto.

A mis Nonnos, Adela y Jaime, por brindarme su amor, porque sin su guía y consejos no hubiera podido ser lo que soy ahora, por el apoyo incondicional en cada etapa de esta investigación y las oportunidades ofrecidas a lo largo de mi vida académica.

A mis padres, Arianna y Ricardo, por cada muestra de amor a lo largo de mi vida, motivándome a alcanzar mis metas, las cuales se han cumplido gracias a la ayuda desinteresada que me han podido brindar. Por el esfuerzo, dedicación para concederme lo que necesitaba y así poder culminar mis estudios.

A las personas que de alguna u otra manera me apoyaron para culminar este proyecto.

Gracias

Diego Alonso Uribe Torres

A M. Sc. Carlos Reinerio Arce Cruzado por el interés, apoyo e instrucción brindada en cada momento, ya que sin su aporte, el progreso de esta investigación hubiera sido más complicado. No tan solo hemos tenido un asesor, sino hemos ganado un colega y gran amigo en la vida, agradecemos sus enseñanzas, consejos y amistad.

A Industrial Papelera Atlas S.A., en especial al Gerente Comercial Ricardo Temoche y al Jefe de Control de Calidad Ing. Rodrigo Rodríguez Guillén, quienes amablemente garantizaron que nuestra visita sea aprovechada al máximo, brindándonos información importante para nuestro proyecto.

Por la orientación generosa en cada análisis realizado durante el desarrollo de la investigación, por su amabilidad y disposición al Sr. Floriano Saucedo Gallardo - Técnico del laboratorio de Físico-Química, FIQIA.

De la misma forma queremos agradecer al Bioquímico Augusto Niño Martínez, que por su experiencia nos instruyó en el correcto procedimiento de los análisis descritos en su manual, a la Dra. Consuelo Rojas Idrogo por concedernos sus conocimientos, ayudarnos y facilitarnos el uso del equipo esencial para los análisis de la materia prima, y al Ing. Iván Curay Véliz (Técnico del laboratorio de Nutrición-Facultad de Ingeniería Zootecnia) por su tiempo en la ejecución de los análisis de control de calidad, así como también su compañerismo.

Y a todas las personas que influyeron directa o indirectamente en la culminación de esta investigación. Gracias.

Celine Delgado y Diego Uribe

“El conocimiento es válido si se ajusta a la Naturaleza y nos permite concebir sus leyes internas, sea para respetarlas mejor, sea para corregir los desvíos que se hubieran cometido consciente o inconscientemente.”

Delia Steinberg Guzmán

“La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.”

Aristóteles

INDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
2.1. Material lignocelulósico no maderero	5
2.2. Hojas de caña de azúcar	7
2.2.1. Componentes Estructurales	10
2.3. Pulpa de Celulosa.....	21
2.3.1. Proceso de la pulpa de celulosa.....	25
2.3.2. Pulpa de celulosa a partir de fibras no madereras	26
2.4. Caracterización de la materia prima	32
2.5. Influencia de las propiedades físicas y morfológicas de la materia prima sobre la pulpa	32
2.6. Influencia de las propiedades químicas de la materia prima sobre la pulpa	36
2.7. Consideraciones de la calidad de la pulpa de celulosa	37
2.8. Impacto ambiental	41
2.8.1. Quema de la caña de azúcar	42
2.8.2. Tala indiscriminada de árboles.....	44
2.8.3. Contaminantes de la industria pastero-papelera	48
2.9. Diseño factorial tres niveles: 3 ³	49

III.	MATERIALES Y MÉTODOS	53
3.1.	MATERIALES	53
3.1.1.	Muestra	53
3.1.2.	Equipos	55
3.1.3.	Reactivos	55
3.2.	MÉTODOS	56
3.2.1.	Caracterización de la materia prima	56
3.2.2.	Proceso de obtención de pulpa de celulosa	66
3.2.3.	Control de la calidad de la pulpa de celulosa	69
IV.	RESULTADOS	78
4.1.	Composición química de las hojas de caña de azúcar	78
4.1.1.	Determinación de humedad	78
4.1.2.	Determinación de extraíbles solubles en agua	78
4.1.3.	Determinación de extraíbles orgánicos	78
4.1.4.	Determinación de lignina	79
4.1.5.	Determinación de celulosa	79
4.1.6.	Determinación de hemicelulosa	80
4.1.7.	Determinación de cenizas	80
4.2.	Pulpaje en sus diferentes combinaciones	81
4.3.	Control de calidad	82

4.3.1.	En hojas de caña de azúcar	82
4.3.2.	En pulpa de celulosa	83
4.3.3.	Resultados de optimización.....	87
V.	DISCUSIÓN	98
VI.	CONCLUSIONES	105
VII.	RECOMENDACIONES	106
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXOS.....	122

INDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Clasificación de plantas no madereras	7
Tabla 2 Composición de la caña en plantación	10
Tabla 3 Composición química de algunas fibras naturales	18
Tabla 4 Producción de hojas de caña de azúcar (tn) en el mundo.....	20
Tabla 5 Producción de hojas de caña de azúcar (tn) en Perú	21
Tabla 6 Clasificación del coeficiente de flexibilidad	39
Tabla 7 Clasificación del coeficiente de rigidez	39
Tabla 8 Clasificación de Runkel	40
Tabla 9 Diseño factorial tres niveles - 3 ³	51
Tabla 10 Combinación variables en la obtención de pulpa para la fabricación de papel a partir de hojas de caña de azúcar	54
Tabla 11 Clasificación de los procesos de producción de pulpa de madera según sus rendimientos ^a	76
Tabla 12 Porcentaje de humedad (%) en hojas de caña de azúcar	78
Tabla 13 Porcentaje de extraíbles solubles en agua (%) en las hojas de caña de azúcar	78
Tabla 14 Porcentaje de extraíbles orgánicos (%) en las hojas de caña de azúcar	79
Tabla 15 Porcentaje de lignina (%) en hojas de caña de azúcar.....	79
Tabla 16 Porcentaje de celulosa (%) en hojas de caña de azúcar	79
Tabla 17 Porcentaje de hemicelulosa (%) en hojas de caña de azúcar	80

Tabla 18 Porcentaje de cenizas (%) en hojas de caña de azúcar	80
Tabla 19 Composición química (%) de las hojas de caña de azúcar	80
Tabla 20 Combinación de tiempo de cocción, concentración de Na(OH) y tamaño de partícula experimentados para la obtención de pulpa a partir de hojas de caña de azúcar	81
Tabla 21 Densidad (g/cm ³) de las hojas de caña de azúcar.....	82
Tabla 22 Dimensionamiento de la fibra (μm) de las hojas de caña de azúcar	82
Tabla 23 Coeficientes de flexibilidad, rigidez y Peteri, y relación de Runkel hallados a partir del dimensionamiento de las fibras de hojas de caña de azúcar	83
Tabla 24 Porcentaje de celulosa (%) en pulpa de celulosa	84
Tabla 25 Porcentaje de lignina (%) en pulpa de celulosa	85
Tabla 26 Porcentaje de rendimiento (%) y rendimiento corregido (%)	86
Tabla 27 Análisis de varianza para el rendimiento	87
Tabla 28 Efectos estimados para rendimiento	89
Tabla 29 Análisis de varianza corregido para rendimiento	89
Tabla 30 Efectos estimados corregidos para el rendimiento	90
Tabla 31 Coeficientes de regresión para rendimiento	91
Tabla 32 Valores óptimos de las variables independientes.....	92
Tabla 33 Resultados del control de calidad en hojas y pulpa	96
Tabla 34 Producción mundial de caña de azúcar (tn) en los últimos años	123
Tabla 35 Producción de caña de azúcar (tn) a nivel nacional en los últimos años.....	124

Tabla 36 Parámetros de las variables de la primera muestra	145
Tabla 37 Principales indicadores para caracterizar la fibra en la industria pastero-papelera.....	147
Tabla 38 Dimensionamiento de fibra (μm) de la muestra 1	152
Tabla 39 Dimensionamiento de fibra (μm) de la muestra 2	153
Tabla 40 Dimensionamiento de fibra (μm) de la muestra 3	153
Tabla 41 Promedio total del dimensionamiento (μm)	154
Tabla 42 Composición de madera y pulpa no blanqueada expresada en porcentaje de madera original (%)	157
Tabla 43 Cantidad de celulosa y lignina en pulpa (g) para Pino y Abedul.	158
Tabla 44 Composición química de pulpa kraft no blanqueda (%).....	158
Tabla 45 Dimensiones (m) y densidad (kg/m^3) del Eucalyptus Saligna.....	159
Tabla 46 Superficie cosechada de caña de azúcar (ha) en los últimos años	161

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Morfología de la hoja de la caña de azúcar.	8
Figura 2 Enumeración de las hojas de caña de azúcar	9
Figura 3 Representación esquemática de la organización de los diferentes biopolímeros de la pared celular de una angiosperma no leñosa.	11
Figura 4 Modelo de moléculas de celulosa unidas por puentes de hidrógeno.	12
Figura 5 Unidades estructurales de la lignina	15
Figura 6 Vías de utilización de las hojas de caña de azúcar.....	19
Figura 7 Propiedades Biométricas de la Fibra	34
Figura 8 Diagrama de bloques de la obtención de pulpa a partir de hojas de caña de azúcar	68
Figura 9 Diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento.....	88
Figura 10 Corrección del diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento	90
Figura 11 Superficie de respuesta estimada para rendimiento ($T_p=cte$).....	92
Figura 12 Contornos de la superficie de respuesta estimada ($T_p=cte$).	93
Figura 13 Superficie de respuesta estimada para rendimiento ($T=cte$).	93
Figura 14 Contornos de la superficie de respuesta estimada ($T=cte$).	94
Figura 15 Superficie de respuesta estimada para rendimiento ($C_c=cte$).	94
Figura 16 Contornos de la superficie de respuesta estimada ($C_c=cte$).	95

Figura 17 Efectos principales de las variables para el rendimiento.....	96
Figura 18 Recolección de hojas de caña de azúcar.....	138
Figura 19 Lavado de las hojas de caña de azúcar.....	138
Figura 20 Acondicionamiento de las hojas de caña de azúcar.	139
Figura 21 Hojas de caña de azúcar en proceso de cortado.....	140
Figura 22 Hojas de caña de azúcar en proceso de secado	140
Figura 23 Hojas de caña de azúcar de tamaño 2 cm.....	141
Figura 24 Hojas de caña de azúcar de tamaño 0.5 cm.....	141
Figura 25 Hojas de caña de azúcar en el proceso de molienda	141
Figura 26 Hojas de caña de azúcar en el proceso de tamizado.	142
Figura 27 Hojas de caña de azúcar de tamaño 0.1 cm.....	142
Figura 28 Pesado de hojas de caña de azúcar.	143
Figura 29 Adicionamiento del Na(OH)	143
Figura 30 Proceso de cocción de las hojas de caña de azúcar.	143
Figura 31 Lavado de la pulpa con agua destilada.....	144
Figura 32. Pulpa húmeda antes de entrar a estufa	144
Figura 33 Pulpa seca.	144
Figura 34 Diámetro de la fibra de la hoja de caña de azúcar.....	148
Figura 35 Diámetro de lumen de la fibra de la hoja de caña de azúcar	148
Figura 36 Grosor de la pared celular de la hoja de caña de azúcar.....	149
Figura 37 Largo de la fibra (paquete de fibras) de la hoja de caña de azúcar	149
Figura 38 Estufa.....	162
Figura 39 Mufla	162

Figura 40 Cocina eléctrica	162
Figura 41 Balanza analítica.....	162
Figura 42 Licuadora	162
Figura 43 Microscopio binocular	162
Figura 44 Cámara para microscopio	162
Figura 45 Interfaz del programa Microsoft Excel 2013.....	162
Figura 46 Interfaz del programa Microsoft Word 2013.....	162
Figura 47 Interfaz del programa STATGRAPHICS CENTURION XVI.I. ...	162
Figura 48 Interfaz del programa Motic Images Plus 2.0 ML.....	162

RESUMEN

La región de Lambayeque es una de las más importantes en lo que respecta el sembrío y producción de caña de azúcar, en donde la empresa agroindustrial Tumán es una de las más relevantes. El método que se usa para limpiar la caña de azúcar y tenerla lista para ingresar a la producción de azúcar es anticuado, ya que prenden los campos de cultivo para quemar las hojas, esto hace que se produzca cenizas y humo que afectan a la sociedad cercana y medio ambiente, es por ello que surge la necesidad de buscar algún uso que puedan tener estas hojas para su aprovechamiento. Uno de los tantos caminos que pueden seguir las hojas de caña de azúcar en su utilización es como materia prima para la fabricación de papel, ya que tienen las características necesarias para dar pulpa de celulosa de alta calidad.

En este trabajo de investigación se basó en la determinación de la mejor combinación de tres variables, con tres niveles, que son tiempo de cocción (1; 1.5 y 2 horas), concentración de Na(OH) (5%, 10% y 15%) y tamaño de partícula (0.1cm; 0.5cm y 2cm), para la obtención de pulpa de celulosa a partir de hojas de caña de azúcar; se empleó un diseño factorial completo que dio como resultado 27 experimentos, los cuales se repitieron tres veces.

El mayor rendimiento de la experimentación fue de 34.47% con una combinación de variables de 1 hora para tiempo de cocción, 5% de concentración de Na(OH), 2 cm. de tamaño de partícula, este y todos los resultados obtenidos se analizaron estadísticamente, para ello se utilizó el programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I, el cual nos brindó el análisis de

varianza, el modelo matemático y gráficos que fueron de gran ayuda para representar el comportamiento que tuvieron las variables sobre las hojas de caña de azúcar, dando como respuesta los valores óptimos de cada variable.

Las pulpas obtenidas se sometieron a un análisis de calidad en donde se determinó el porcentaje de lignina y celulosa, los cuales fueron 5.03% y 86.73% respectivamente para la pulpa de mayor rendimiento. Para el caso de las hojas de caña de azúcar se dimensionó la fibra para obtener el coeficiente de flexibilidad, rigidez, Runkel y Peteri, los cuales fueron 0.79; 0.22; 0.27 y 707.17 respectivamente, los que influyen mucho en el comportamiento de las hojas, también se analizó la densidad básica, que fue 0.287 gr/cm³.

ABSTRACT

The region of Lambayeque (Perú) is one of the most important as regards the sowing and production of sugarcane, where the agricultural enterprise Tumán is one of the most noteworthy. The method used to clean the sugarcane and make it ready to enter into sugar production, which is now outdated as they turn up the field to burn the cane leaves. This releases smoke and ashes which affect the nearby environment and people; therefore, the need arises to find some way the leaves can become of use. One of the many methods to make use of sugarcane leaves is as raw material for making paper, taking into account the characteristics necessary to produce pulp of high quality cellulose.

Three study variables were used with three levels of cooking time (1; 1.5 and 2 hours), Na(OH) concentration (5%, 10% and 15%) and particle size (0.1 Cm; 0.5cm and 2cm), a complete factorial design was used which resulted in 27 experiments, which were repeated three times. For the process, 5 grams of sugarcane leaves without moisture were used, these ones being immersed into a Na(OH) solution, inside glass bottles with a screw cap, then it was stirred with a rod for its homogenous mixture. After ending the selected cooking time, the sample was washed with distilled water, then it was dried in the oven at 105°C for 2 hours and finally weighed with an analytical scale to obtain the amount of dry pulp, and thus could calculate the percentage of the yield.

The highest performance of the experiment was 34.47%, this and all the results obtained were statistically analyzed, making use of the computer program STATGRAPHICS Centurion XVI.I, which gave the variance analysis, the

mathematical model and graphs that were a great help to understand the behavior of variables on the leaves of sugarcane, stating the best response to the same combination of experiments. In the program the results are adjusted to the ideal and for that reason the yield gave 34.76%, very close to the real one.

The pulps obtained were subjected to a quality analysis in which the percentage of lignin and cellulose were determined, which were 5.03 and 86.73%, respectively, for the pulp of higher yield. For the case of the sugarcane leaves the fiber was dimensioned to obtain the coefficients of flexibility, rigidity, *Runkel* and *Peteri*, which were 0.79; 0.22; 0.27 and 707.17, respectively, which exhibits the behavior of the leaves, basic density was also analyzed, which resulted 0.287 gr/cm³.

II. INTRODUCCIÓN

En la región Lambayeque, la azucarera, es una de las industrias predominantes; sin embargo trae consigo una innumerable lista de factores contaminantes¹, uno de los problemas más contaminantes para el medio ambiente de esta industria es sin duda la quema de la caña de azúcar, esta es una práctica muy extendida en los trópicos, que se usa para la eliminación de la cobertura vegetal, el control de malezas, la disminución del material seco y reducción de los costos de cosecha, así como para eliminar los residuos sobrantes y acelerar la preparación del suelo y replantación.²

En lo que respecta a la contaminación atmosférica, la quema de la caña de azúcar antes y después de la cosecha, se encuentra junto a otros factores como causa del deterioro de la calidad del aire. La adopción de la quema antes de la cosecha para facilitar este trabajo y de la requema de los residuos para facilitar las labores pos cosecha, generan un impacto ambiental negativo sobre todo en las poblaciones asentadas alrededor de las áreas de cultivo de la caña de azúcar. En el momento de la quema se puede observar la gran cantidad de humo y cenizas que ocasionan la quema de la caña, teniendo grandes repercusiones en el medio ambiente así como problemas de salud para la humanidad³.

Otra de las industrias más contaminantes es la pastero-papelera, esta es una de las tantas actividades humanas que atentan contra el equilibrio del medio ambiente⁴. Una de los más grandes problemas de esta industria es la tala indiscriminada de árboles que trae consigo agudización de las sequías, inundaciones, erosión y otros⁵. Además tiene incidencias negativas en diferentes medios como agua, aire y suelo⁶.

Las prácticas modernas de tala forestal y las plantaciones desmesuradas de monocultivos de crecimiento rápido, al servicio de la industria papelera, por su parte, tienen un impacto desastroso sobre el ambiente⁷, por ello la tendencia mundial para aprovechar los recursos ha incidido para que, en el caso de la industria de pulpas celulósicas aprovechen mejor la materia prima y se reduzca el impacto ambiental. La disminución de los costos de pulpeo se viene logrando con la incorporación de pulpas de alto rendimiento, reduciendo la carga de efluentes como sólidos. Asimismo, el empleo de plantas no madereras, entre ellas los desperdicios agrícolas ha permitido reducir el impacto sobre los bosques, cambiando la madera por residuos agrícolas. El aprovechamiento de estos residuos es hasta ahora la mejor opción dentro del uso de plantas no madereras⁸.

Es por ello que este estudio trata de brindar una solución amigable para el medio ambiente y sociedad cercana, partiendo de la situación de nuestra región Lambayeque, en la que tenemos la disponibilidad de las hojas de caña

de azúcar, que actualmente son quemadas y perjudican al medio ambiente, y que son la materia prima fundamental para nuestro proyecto; conociendo su composición y sabiendo que la caña de azúcar es de origen no leñoso se pensó que es una opción viable para la obtención de pulpa de celulosa, la cual es indispensable para la fabricación de papel.

El objetivo principal de este trabajo de investigación es determinar los parámetros más eficientes, concentración de soda cáustica, tiempo de cocción y tamaño de partícula, en la obtención de pulpa para la fabricación de papel a partir de las hojas de caña de azúcar, las mismas que fueron recolectadas de los campos de cultivo del distrito de Tuman, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque.

Así también los objetivos específicos que se plantearon fueron: la obtención de pulpa de alta calidad y la comprobación de que si esta alternativa permite la disminución de la contaminación del medio ambiente.

Esta investigación se realizó de la siguiente manera:

En la sección de fundamento teórico se conceptualiza de manera detallada los términos fundamentales para el entendimiento y realización de este trabajo,

También se describe de manera amplia en la sección denominada Materiales y métodos, muestreo, los equipos y reactivos utilizados y la combinación de las variables independientes para cada experimento. Además se muestran los procedimientos que se siguieron para la caracterización de la materia prima, el proceso de obtención de pulpa de celulosa y el control de calidad a la misma.

Y por último en los resultados se describen los mismos tanto de los análisis de caracterización de materia prima, como del pulpaje y del control de calidad son expresados por medio de diagrama de bloques y tablas con su respectiva interpretación.

También se realizó un análisis estadístico de los resultados obtenidos del pulpaje de hojas de caña de azúcar, que se plasmó en tablas y gráficos mediante un programa estadístico.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Material lignocelulósico no maderero

El material lignocelulósico consiste en tres principales tipos diferentes de polímeros estructurales: celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa está compuesta por subunidades de D-glucosa unidas por un enlace glucosídico β 1-4⁹.

Además presenta componentes secundarios, generalmente en menor proporción y son de dos tipos; por un lado componentes de bajo peso molecular, hidrosolubles o extraíbles en solventes orgánicos que se denominan extractos y por otro materiales minerales que en los análisis químicos se estiman como cenizas.

Está constituido por los tejidos de los vegetales cuyas células presentan una pared constituida por un entramado de micro fibrillas de celulosa formando capas recubiertas de hemicelulosas y sobre las que se deposita la lignina. Esta estructura surge como respuesta a una necesidad de los vegetales. La pared celular permite crear y sostener la estructura aérea en las plantas que les permite captar la radiación solar. Así tejidos con células lignificadas dotan a sus órganos, principalmente tallos, de mayor esbeltez y mayor resistencia mecánica, además de mejorar su regulación hídrica y su resistencia a patógenos¹⁰.

En la industria papelera a este material se le denomina recurso fibroso no maderero y se clasifican en 3 categorías principales:

2.1.1. Residuos agrícolas

Y agroindustriales, que incluyen los tallos de cereales, el bagazo de la caña de azúcar.

2.1.2. Plantas Silvestres

Cosechadas de áreas naturales, dentro de las que figura el bambú, las cañas, el esparto.

2.1.3. Plantas cultivadas

Con el fin de aprovechar sus fibras; incluye fibras de hojas como el abacá, cáñamo de Manila, el sisal. También incluye fibras de cordelería como las del yute, cáñamo el lino¹¹.

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 año¹².

Con el fin de ilustrar mejor el tipo de fibras no madereras, se elabora la clasificación de materias primas para pulpa:

Tabla 1*Clasificación de plantas no madereras*

Plantas no madereras	Grupo Botánico	Características	Ejemplos
a.- Fibras de Tallos			
a.1.- Haces Vasculares	Gramíneas	Fibras Cortas Tejidos de haces fibrosos	-Bagazo de Caña de Azúcar -Cereales: Arroz, cebada, trigo, avena, etc. -Bambús, cañas, crotalaria. -Pastos: Esparto, inea (ichu).
a.2.- Fibras Liberianas	Docotiledóneas	Tejido floemático (de corteza)	-Plantas anuales: Cáñamo de manila, yute, etc.
b.- Fibras de Frutos	Malvaceas Bombacaceas	Fibras largas de alta resistencia	-Semilla de algodón (linters). -Semilla de kapok o huimbas.
c.- Fibras de hojas	Suculentas Palmeras		-Suculentas (cabuya, sisal, etc.) -Palmeras (aguaje, palma africana, etc.)

Nota. Recuperado de “Recursos fibrosos de plantas no madereras para la industria papelera” por Gonzales, H. 2003. (Tesis doctoral) ¹³

2.2. Hojas de caña de azúcar

La caña de azúcar se refiere a las especies de las hierbas altas perennes del género *Saccharum* que incluye familia Poaceae y familia Andropogoneae. La caña de azúcar es económicamente importante como otra familia de semillas, como maíz, trigo y arroz. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), la caña de azúcar se cultiva en unos 20 millones de hectáreas en más de 90 países. En la India, producen cerca

de 320 millones de residuos agrícolas, principalmente trigo, paja de arroz y hojas de caña. Se estima que alrededor de 100 millones de toneladas de este residuo agrícola no se utilizaron adecuadamente y se desecharon al aire libre. La hoja de caña de azúcar es una de las partes importantes de la caña de azúcar¹⁴, son los "motores" fotosintéticos de la planta, produciendo el azúcar que se almacena en los tallos¹⁵.

La hoja de la caña de azúcar está formada por dos partes: la vaina y el limbo, separadas por la articulación de unión del limbo (Figura 1). El limbo o lámina, como su nombre indica, cubre completamente el tallo, extendiéndose casi por todo el entrenudo. Las hojas generalmente están dispuestas en forma alternada a lo largo de los nudos, formando así dos flancos en lados opuestos. En su parte superior una planta madura de caña de azúcar tiene una superficie foliar cercana a 0.5 m² y el número de hojas verdes por tallo es alrededor de 10, dependiendo de la variedad y de las condiciones de cultivo¹⁶.

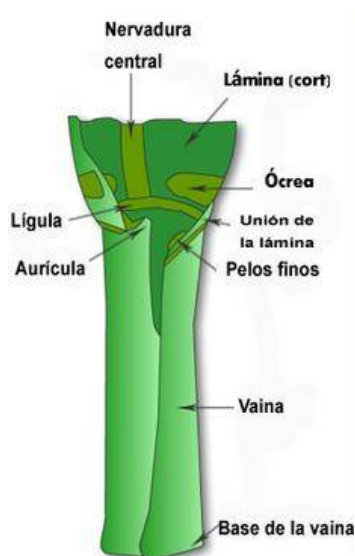


Figura 1. Morfología de la hoja de la caña de azúcar. Recuperado de http://www.sugarresearch.com.au/icms_docs/166939_Chapter_4_The_Sugarcane_Plant.pdf

Las hojas se vuelven más largas y más anchas a medida que la planta se desarrolla, hasta que se establece un tamaño de hoja estable. El ancho foliar se correlaciona fuertemente con el diámetro del tallo y varía de aproximadamente 20 mm a 60 mm en las variedades comerciales. La longitud de la hoja depende de la variedad y de las condiciones de crecimiento, pero suele estar entre 0.9 m a 2.0 m en las hojas maduras¹⁵.

En la unión del limbo se encuentran dos áreas triangulares llamadas ócreas o trozos ligulares. Las hojas son enumeradas según el sistema de Kuijper. La primera hoja desde el ápice hacia abajo que tiene ócreas visibles se designa como +1. Hacia abajo las hojas reciben sucesivamente los números +2 y +3 (Figura 2). La hoja superior con ócreas visibles es un tejido de diagnóstico que es utilizado frecuentemente en la evaluación del estado nutricional¹⁶.

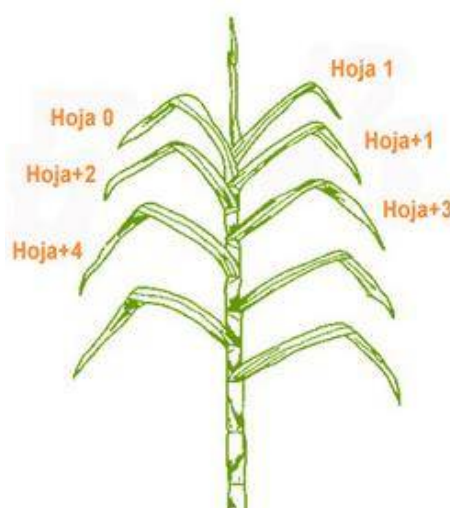


Figura 2. Enumeración de las hojas de caña de azúcar. Recuperado de http://www.sugarresearch.com.au/icms_docs/166939_Chapter_4_The_Sugarcane_Plant.pdf

La caña de azúcar está constituida en forma natural de la siguiente manera:

Tabla 2

Composición de la caña en plantación

Componente	Contenido (%)
Cogollo y hojas verdes	8.44
Vainas y hojas secas (paja)	19.74
Tallos limpios	71.82

Nota. Recuperado de “La Industria de los Derivados de la Caña de Azúcar. Capítulo V. Utilización de los residuos” por Padilla, J. y Correa, J. 1980.¹⁷

2.2.1. Componentes Estructurales

Las hojas de caña de azúcar, al ser un material lignocelulósico, están constituidas por los tejidos de los vegetales cuyas células presentan una pared celular constituida por un entramado de micro fibrillas de celulosa formando capas recubiertas de hemicelulosas y sobre las que se deposita la lignina (Figura 3)¹⁸.

La celulosa es el componente mayoritario (sobre un 50%), seguida de la lignina (alrededor de un 20%) y de la hemicelulosa (alrededor de un 15%).¹⁹

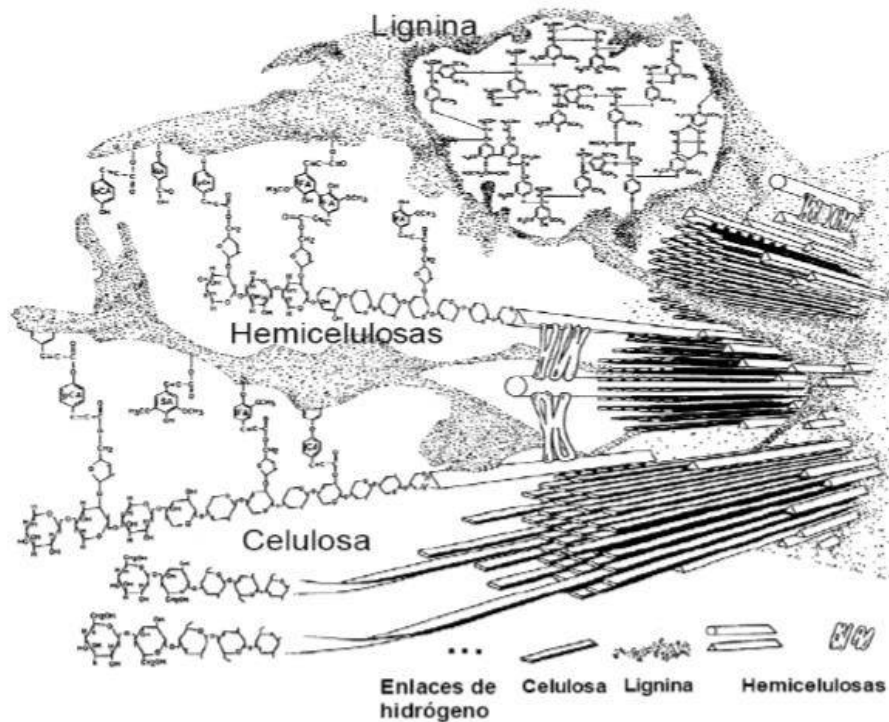


Figura 3. Representación esquemática de la organización de los diferentes biopolímeros de la pared celular de una angiosperma no leñosa. Recuperado de “Caracterización química de fibras de plantas herbáceas utilizadas para la fabricación de pastas de papel de alta calidad” por Rodríguez, I. 2006. (Tesis doctoral).²⁰

2.2.1.1. Celulosa

La celulosa constituye la fracción mayoritaria de los materiales lignocelulósicos, con una proporción del 40-50 % del peso seco en las especies madereras y del 25-40 % en los residuos agrícolas y agroalimentarios²¹.

La celulosa es la base estructural de las plantas, es de carácter higroscópico, siendo químicamente definida como un heteropolímero lineal constituido por unidades de D-glucopiranosas unidas mediante enlaces glucosídicos en la configuración $\beta(1-4)$ ²², donde dos moléculas de glucosa se unen por la

eliminación de una molécula de agua entre dos grupos hidroxilo de los carbonos C1 y el C4 de la otra unidad para formar la molécula de celobiosa, un disacárido que representa la unidad constitutiva de la celulosa²³.

Los enlaces covalentes dentro y entre las unidades de glucosa dan como resultado una molécula recta y rígida, con alta resistencia a la tensión. Además, las moléculas de celulosa tienden a formar puentes de hidrógeno intra e intermoleculares, con un efecto profundo sobre la morfología, rigidez, orientación, resistencia y reactividad de las cadenas celulósicas²¹.

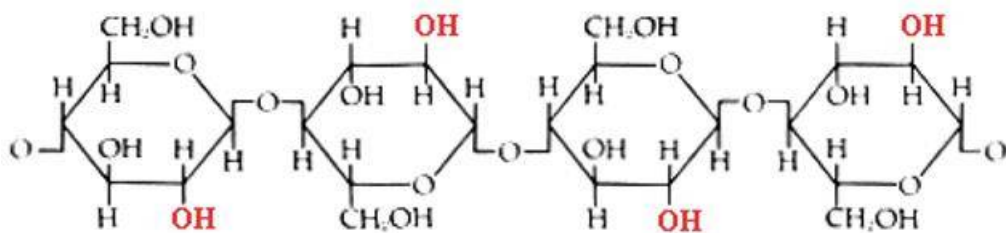


Figura 4. Modelo de moléculas de celulosa unidas por puentes de hidrógeno. Recuperado de “Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas” Princen, P. 2010. (Tesis de maestría).²¹

La celulosa es insoluble en la mayoría de los disolventes, incluyendo álcalis fuertes, y es difícil aislarla de los materiales lignocelulósicos en forma pura, debido a que se encuentra íntimamente ligada con la lignina y las hemicelulosas²¹.

2.2.1.2. Hemicelulosa:

La celulosa y la lignina de las paredes celulares de la planta están estrechamente interpenetradas por una mezcla de polisacáridos

denominados hemicelulosas. El nombre de hemicelulosa lo sugirió originalmente Schulze²⁴ en 1891, para designar a los polisacáridos extraíbles de las plantas mediante álcali acuoso. En general, las hemicelulosas son sustancias insolubles en agua, solubles en álcali, y que se hidrolizan más fácilmente en ácidos que lo que ocurre con la celulosa²⁵.

La hemicelulosa es heteropolisacárido de alta masa molar, que se encuentra constituida por pentosas hexosas y ácidos urónicos, enlazados entre sí por enlaces glicosídicos, formando estructuras ramificadas y en general amorfas, que reducen cristalinidad de la estructura de la planta²³.

Las hemicelulosas actúan como matriz de soporte para las microfibrillas de celulosa, y constituyen el 25-35 % de ella, pero este porcentaje varía sensiblemente entre las especies vegetales. Las hemicelulosas, con estructura amorfa y ramificada, ejercen de almacén de sustancias de reserva en la pared celular, teniendo una función reguladora, estructural y, por tanto, de control de la expansión celular²¹.

La función principal es su interacción con la celulosa y lignina para proporcionar rigidez a la pared celular. Las cadenas de hemicelulosas se asocian con las microfibrillas de celulosa tras su carácter polar (puentes de hidrógeno). Su comportamiento físico-químico, principalmente su capacidad de enlace y su comportamiento visco-elástico, es de gran importancia para proporcionar propiedades deseadas como grado de hinchamiento, (re)hidratación, plasticidad, flexibilidad, rigidez, dureza, etc. durante el proceso de fabricación de papel²⁰.

2.2.1.3. Lignina:

La lignina se define como un heteropolímero aromático tridimensional con estructura irregular formado por unidades de fenilpropano, unidas por diferentes tipos de enlaces, que varían entre las especies vegetales, situación en la planta, naturaleza, edad y condiciones de crecimiento de las células¹⁹.

Después de la celulosa, es el polímero más abundante en el mundo vegetal de carácter hidrófobo, protege a los tejidos contra la humedad y los agentes atmosféricos. Es muy diferente de la celulosa y de las hemicelulosas, pues es un polímero aromático formado por la condensación oxidativa de los precursores fenólicos²³.

Los monómeros que la conforman son los denominados alcoholes p-hidroxicinamílicos, que incluyen el alcohol p-cumarílico que da lugar a las unidades de phidroxifenilo (unidades H) y no presenta ningún sustituyente; el alcohol coniferílico que da lugar a las unidades guayacilo (unidades G), presentando un grupo metoxilo en la posición 3 del anillo aromático; y el alcohol sinapílico que da lugar a las unidades siringilo (unidades S), presentando dos grupos metoxilo en las posiciones 3 y 5 del anillo²¹.

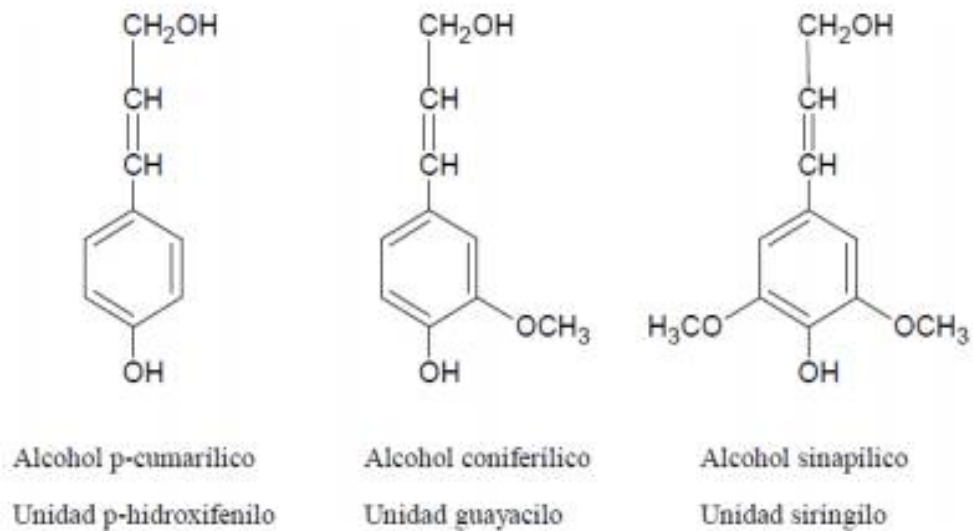


Figura 5. Unidades estructurales de la lignina. Recuperado de “Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas” Princen, P. 2010. (Tesis de maestría).

Para el productor de pulpa y papel, la lignina es el ingrediente indeseable que ocasiona la mayoría de problemas que surgen durante la producción de pulpa. De no ser por la lignina no resultaría necesario aplicar reactivos fuertes alcalinos o ácidos para la deslignificación química a fin de obtener pulpa y productos de papel²⁶.

2.2.1.4. Extractivos:

Son los componentes orgánicos de bajo peso molecular. Se llaman así porque se pueden extraer de la madera por lavado con agua o con solventes orgánicos. Sus funciones en la célula vegetal son de protección exterior y reserva de nutrientes.

Estos componentes representan un 0-10 %, aunque puede llegar en algunos casos al 40 % en peso seco de los materiales lignocelulósicos. Estos componentes no influyen en la estructura morfológica de las células, pero tienen influencia en el procesamiento de los materiales lignocelulósicos, siendo los más importantes los siguientes²¹:

Agua: Procede de los fluidos biológicos de las plantas, del carácter higroscópico de los materiales lignocelulósicos, así como de las condiciones ambientales. Representa un 0.08-0.10 % del peso seco de los materiales lignocelulósicos.

Cenizas: Suelen ser sales inorgánicas como cloruros, sulfatos, silicatos, compuestos de calcio, potasio y magnesio, y en menor medida de fósforo, manganeso, hierro, cobre, zinc, sodio o cloro. Representan en torno a 0-15 % del peso seco de los materiales lignocelulósicos.

Proteínas: Suelen estar presentes en pequeñas cantidades, siendo las principales las extensinas, lectinas, proteínas arabino-galactano, proteínas ricas en glicina y proteínas ricas en prolina.

Extraíbles: Son restos de los fluidos biológicos de los vegetales de composición heterogénea, que se extraen fácilmente con distintos disolventes orgánicos.

Sustancias pécticas: Son polímeros ricos en ácido D-galactourónico con una cadena lineal altamente ramificada, siendo los principales el homogalactouronano, los ramnogalactouronano I y II y el arabinogalactano. Suelen estar presentes en porcentajes menores al 1 %²¹.

2.2.1.4.1. Influencia de los extractivos

1. Reduce el rendimiento en los procesos de pulpeo ya que son fácilmente solubles en los licores de cocción empleados.
2. Aumentan el consumo de reactivos. Muchos extractivos reaccionan con los productos químicos usados para la cocción, haciendo que su consumo aumente.
3. Inhiben la reacción de deslignificación. Esto puede ser debido a que la impermeabilización de la madera por los extractivos dificulta la entrada de licor de cocción.
4. Corrosión de equipos. Extractivos de carácter ácido forman complejos con los metales usados en la construcción de los equipos, causando problemas de corrosión.
5. Calidad de la pasta. Ciertos extractivos hacen a la pulpa más oscura y más difícil de blanquear²⁷.

La composición química de las fibras depende de la fuente de la cual procedan, pero de una manera general se puede decir que sí existe una parte mayoritaria que corresponde a la celulosa, entre un 40 y 50%, aunque algunas veces es superior como en el caso de los linters de algodón, entre un 10 y 30% de lignina y de 20 a 30% de hemicelulosas. Estas últimas sustancias que son heteropolímeros presentan una gran variedad en composición según las diferentes especies (Tabla 3)²⁸.

Tabla 3*Composición química de algunas fibras naturales*

Tipo de fibra	(%)					
	Celulosa	Lignina	Hemicelulosa	Cenizas	Sílice	Extraíb.
Fibras de paja						
Arroz	28-36	12-16	23-28	15-20	9-14	8-13
Trigo	29-35	16-21	26-32	4.5-9	3-7	
Avena	31-37	16-19	27-38	6-8	4-6.5	
Centeno	33-35	16-19	27-30	2-5	0.5-4	
Fibras de caña						
Azúcar	32-44	19-24	27-32	1.5-5	0.7-3.5	
Bambú	26-43	21-31	16-26	1.7-5	0.7	
Fibras de hierbas						
Esparto	33-38	17-19	27-32	6-8		12
Hierba de elefante	22	23.9	24	6		
Fibras de tallos	44.75	22.8	20	3	2	
Fibras de Peroliberianas						
Limo	43-47	21-23	24-26	5		
Kenaf	31-39	15-19	22-23	2-5		
Yute	45-53	21-26	18-21	0.5-2		
Fibras de hojas						
Abacá	60.8	8.8	15-17	1.1		
Sisal	43-56	7-9	21-24	0.6-1		
Henequén	77.6	13.1	4-8			
Fibras de granos						
Linters de algodón	80-85		1-3	0.8-2		2-3
Fibras de madera						
Coníferas	40-45	23-34	7-14	<1		4-12
Frondosas	38-49	23-30	19-26	<1		4-12

Nota. Adaptada de "Evaluación de las pulpas obtenidas a partir del pseudotallo de plátano para la elaboración de papel". Paz, Y. 2011 (Tesis de pregrado).^{28 29}

Los usos conocidos de las hojas o paja de caña de azúcar se divide en dos grandes grupos: alimentación animal y fines energéticos.

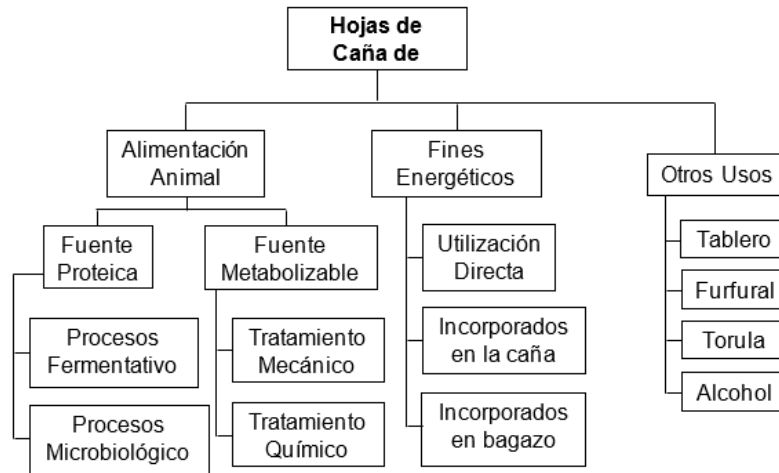


Figura 6. Vías de utilización de las hojas de caña de azúcar. Recuperado de “La Industria de los Derivados de la Caña de Azúcar. Capítulo V. Utilización de los residuos” por Padilla, J. y Correa, J. 1980.

Éstas también pueden ser usadas para desarrollar fibra de celulosa de alta resistencia. La fibra puede ser empleada como pulpa para la producción de papel de imprenta y escritura, siendo un sustituto perfecto frente a otras fibras derivadas de fuentes como madera o bagazo de caña de azúcar³⁰.

Debido a que es un producto de desecho para muchos países, las hojas son una fuente importante de materia prima para la producción de papel, ya que representa el 8.44% de la caña de azúcar en plantación, esto quiere decir que si se producen mundialmente 2.026E⁹ toneladas de caña de azúcar por año (que son representadas por el tallo limpio, el cual equivale al 71.82%), la cantidad de hojas de caña de azúcar que serían materia prima para el proceso de elaboración de algún tipo de papel sería de 2.38E⁸ toneladas por año (Anexo 1, 2 y 3). En los siguientes cuadros se detalla el número de hojas que se produjeron en todo el mundo y en el Perú durante los últimos años:

Tabla 4*Producción de hojas de caña de azúcar (tn) en el mundo*

País	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Argentina	2815683.65	3168231.69	3168231.69	2219863.13	2327626.73	2322867.09	2785129.49	2890533.13
Australia	4277230.3	3833503.12	3558854.92	3696701.2	2959266.36	3050373.94	3188924.14	3586353.66
Brasil	64599413.1	75833104.1	81274796.4	84313483.9	86257465	84738127.3	90262926	86627601.1
China, Continental	13273551.1	14589895	13583288.8	13019481.5	13447944.9	14508585.2	15065659.9	14761339.1
Colombia	4136563.63	3795767.2	4312837.65	3913283.21	4100095.12	3920752.53	4098253.41	4484073.87
Cuba	1398440.55	1845001.39	1750988.58	1351434.14	1856752.99	1727485.38	1892007.8	2091785.02
Estados Unidos de América	3261139.85	2942720.81	3244317.43	2916814.88	3115537.28	3435679.33	3279391.26	3290905.48
Filipinas	3760512.39	3995544.42	3819270.4	3290448.34	3525480.37	3760512.39	3745705.37	3815039.82
India	41779257.4	40917653.5	33495506.7	34350118.4	40235369.2	42427627.6	40096463.4	41382323.6
México	6121333.4	6003977.8	5816184.15	5925347.71	5844690.83	5987027.64	7189873.59	6659964.87
Pakistán	6433014.54	7511623.5	58815048.4	5802106.32	6499634.36	6862582.57	7491634.03	7927630.19
Perú	966994.961	1104175.63	1167750.15	1158115.72	1161638.26	1218507.78	1291764.21	1338462.37
Sudáfrica	231788.583	2262818.29	2192271.67	1882090.03	1974269.01	2030441.66	2115288.22	2148869.6
Tailandia	7563974.77	8637616.22	7852002.29	8086018.27	11275710.3	11563630.3	11762833.4	12186058.5
Otros	40422102.4	41365821.4	40801332.5	40201755	40525302.5	43007575.8	44730767	44913577.4
Total	2.010E+08	2.178E+08	2.649E+08	2.121E+08	2.251E+08	2.306E+08	2.390E+08	2.381E+08

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

Tabla 5*Producción de hojas de caña de azúcar (tn) en Perú*

Año	Ancash	Arequipa	La Libertad	Lambayeque	Lima	Total
2007	72142.1	13642.4	441893.5	241668.7	197648.3	9.67E+05
2008	73801.8	10656.9	510708.7	316063.1	192945.1	1.10E+06
2009	61014.0	7881.7	564948.2	350529.0	183377.2	1.17E+06
2010	67957.6	6222.1	577209.9	331964.9	151955.4	1.14E+06
2011	77998.0	5886.5	584900.9	322953.2	169899.7	1.16E+06
2012	84846.7	7330.6	615134.7	325172.8	186022.9	1.22E+06
2013	102453.6	11408.1	634428.8	358018.2	185455.7	1.29E+06
2014	100770.0	11469.0	682974.9	340157.7	203090.7	1.34E+06
2015	116137.8	6696.1	649827.2	237719.6	189675.9	1.20E+06

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

En la tabla 5 se puede observar una producción de hojas de caña de azúcar de 1.34E⁶ toneladas/año como mayor producción en los últimos 10 años en nuestro país, teniendo como mayores productores a los departamentos de La Libertad y Lambayeque; por lo tanto hay una gran cantidad de hojas de caña de azúcar que podría estar siendo usada para generar otros productos en lugar de ser quemada en los campos y causar así un deterioro del medio ambiente y de las ciudades cercanas.

2.3. Pulpa de Celulosa

Denominada también pasta o pulpa virgen, corresponde al conjunto de fibras individuales obtenidas a partir de materias primas vegetales, conformado por fibras, de constitución lignocelulósica; como ejemplo de vegetales se tiene a la madera, tallos de cereales, caña de azúcar, linter de

algodón; cabe agregar que las fibras corresponden a elementos unicelulares y fusiformes¹².

La pulpa se obtiene por la separación de las fibras de la madera u otros materiales fibrosos; es un producto intermedio en la manufactura de papel y cartón. La producción de pulpa se logra por medios químicos o mecánicos, o mediante combinaciones de los dos procesos. En la producción mecánica de la pulpa los integrantes químicos del material fibroso quedan inalterados, excepto por la eliminación de solubles en agua. La producción química de pulpa tiene como objetivo la eliminación selectiva de la lignina que une las fibras, eliminación variable en grado, con ataque mínimo a las hemicelulosas y las celulosas³¹.

Al elaborarse la pasta, los enlaces dentro de la estructura de las fibras se rompen mediante un proceso de deslignificación, se logra separar la mayor parte de las sustancias no deseadas como la lignina, hemicelulosa, pentosanos y demás, para liberar la celulosa y, dependiendo de los diferentes métodos obtener el porcentaje deseado para los diferentes usos.

Industrialmente existen diversos tipos de pulpaje, con diferentes rendimientos y propiedades de la pulpa que generan. Así tenemos: pulpajes mecánicos, pulpajes semiquímicos, método sulfito y método sulfato, o también llamado Kraft. El tipo de pulpaje influye mucho sobre la calidad y características de la pulpa que se obtiene³².

La pulpa de mejor calidad es la pulpa química que se puede utilizar de dos formas, blanqueada cuando requiere una etapa de blanqueo, posterior al pulpeo para eliminar el color oscuro original, lográndose un alto grado de blancura (más de 70 °GE), utilizada en papeles blancos, sanitarios, de escritura e impresión, y sin blanquear cuando se utilizan como tal, sin requerir blanqueo, siendo la blancura media entre 15 a 35 °GE. Son de mayor resistencia que las pulpas blancas y se les utiliza para elaborar papeles para embalajes, bolsas, envolturas, etc.¹²

Las pulpas celulósicas tienen múltiples aplicaciones, siendo utilizadas principalmente para la elaboración de los siguientes productos:

1. Pulpa para papeles y cartones

Es el uso más importante al cual se destinan las pulpas. Las fibras de pulpa tienen cualidades para formar la estructura del papel; además deben aportar el requisito mínimo de resistencia según el uso. El papel está constituido por más del 80 por ciento de fibras celulósicas, lo que influye significativamente en todas sus propiedades; así como también en sus costos de producción. Las pulpas celulósicas presentan propiedades físicas, mecánicas y químicas que varían según el método de obtención. Por lo general, las pulpas químicas, con bajo contenido de lignina, tienen buenas propiedades de resistencia, lo que la habilita para ser utilizada en casi todo tipo de papeles. En las pulpas semi-químicas, con contenido de lignina residual de 10 a 20 por ciento, las pulpas se utilizan principalmente

sin blanquear, se destinan para elaborar papeles de menor calidad, embalajes, cartones corrugados, etc. En las pulpas mecánicas, donde no ha habido eliminación de lignina durante su obtención, la fibra se comporta como un elemento muy rígido, de poca flexibilidad, pero con buena capacidad de absorbancia, lo que favorece su uso en papeles de impresión, mezclada con otras fibras de mayor resistencia, para elaborar papeles de bajo costo como es el caso del papel periódico¹².

2. Pulpas para Tableros de Fibras

Este producto, denominado comercialmente como fiberboard o "nordex" en el Perú. Para su elaboración se utilizan las denominadas pulpas mecánicas o de alto rendimiento. El tablero está constituido por las fibras aglomeradas que solidifican bajo condiciones de presión y temperatura. El tablero solidifica por las condiciones de trabajo y en este caso tiene mucha importancia la presencia de la lignina, que por sus características termoplásticas permite la reunificación de las fibras en un producto sólido, de alta resistencia. La industria de tableros de fibras se presenta como una alternativa para el aprovechamiento de los residuos madereros. Cabe mencionar que en la actualidad, por las restricciones de las fibras de asbesto, las fibras de pulpas de madera han comenzado a ser utilizadas, con singular éxito, sobretodo en la conformación de los paneles de cemento y calaminas corrugadas¹².

3. Pulpa Para Disolver

También denominada pulpa soluble (dissolving pulp), corresponde a un tipo especial de pulpa química purificada con alto porcentaje de alfa celulosa (más del 90%). La propiedad de esta pulpa es su capacidad para disolverse con introducción de grupos químicos en sus zonas reactivas; luego, la masa se regenera como un sólido, como hilado o en lámina. El producto final, un derivado celulósico, son los hilos de rayón, láminas de celofán o el acetato. Este tipo de industria tiene desarrollo muy localizado, ya que su producción se destina mayormente para la elaboración de hilados sintéticos, siendo el rayón el más importante; este tipo de hilo fue desarrollado con el fin de sustituir al algodón natural, algo que a la fecha no ha podido ser logrado con eficiencia¹².

2.3.1. Proceso de la pulpa de celulosa

En el proceso de elaboración de la pulpa de celulosa las fibras de madera y de otros vegetales se obtienen por separación de las fibras al eliminar el factor cohesión, aplicando algún tipo de energía. El método de separación actúa sobre los puntos de unión fibrilar, en la lámina media, debilitándola o solubilizando sus componentes, pero evitando destruir la pared celular. Se pueden comparar una estructura de fibras y lámina media con una pared de ladrillos y cemento; el ladrillo es el elemento estructural que asemeja a las fibras, este debe ser separado al eliminar la unión que le da el cemento, que viene a ser la lignina; al aplicar algún tipo de energía, química o

mecánica, se separan los ladrillos por disolución del cemento o separación violenta de los ladrillos, que representan las fibras, y de este modo vencer el esfuerzo que da el cemento, que representa la lignina.

Las fibras separadas pueden mantener aún, dentro de su composición, la lignina de la lámina media cuya cantidad remanente está en relación con el método aplicado y su eficiencia. Precisamente, por esta razón, se obtienen pulpas de diferentes calidades y comportamientos frente a los diversos tratamientos que se aplican al obtener el producto final. La fibra celulósica es un elemento que presenta cualidades de flexibilidad y aptitud a los tratamientos posteriores de blanqueo y refinado, según las características de la pared fibrilar y su constitución química¹².

2.3.2. Pulpa de celulosa a partir de fibras no madereras (hojas de caña de azúcar)

La mayor parte de la pulpa y el papel producidos en el mundo se obtiene de la madera, lo que es evidentemente más cierto allí donde la madera abunda y es relativamente barata. En muchas zonas del mundo, los recursos en madera son limitados; por el contrario se dispone de cantidades considerables de plantas al año, algunas de las cuales constituyen una fuente excelente de fibras para la industria del papel³³.

El uso creciente de fibras agrícolas es una de las formas de ofrecer a los consumidores una gama más amplia de productos ecológicos. La

creciente conciencia de la deforestación global también aumenta la demanda de materias primas alternativas para la fabricación de pasta de madera y papel.

En 1972, según la FAO, la capacidad mundial para la producción de pulpa obtenida de fibras no leñosas constituye solo el 5% de la producción total mundial de pulpa, sobre la base del porcentaje, ha aumentado esta producción a un ritmo más acelerado que el correspondiente a la producción de la pulpa de madera. Solo en Latinoamérica, se ha duplicado la producción de este tipo de pulpa durante la última década, y en África y en el Oriente Medio, casi se ha triplicado³³.

Hasta el momento, se utilizan diversas plantas para la producción de pasta de celulosa, como algodón, cáñamo, agave, lino, kapok, sisal, ramio y cáñamo. Los estudios actuales indican la posibilidad de obtener fibras naturales de celulosa a partir de paja de trigo³⁴, paja de arroz³⁵, tallos de maíz y hojas^{36 37}, hojas y tallos de sorgo³⁸, hojas de piña³⁹, hojas de plátano⁴⁰, la caña de azúcar⁴¹ e incluso de la ortiga⁴².

La pulpa de celulosa a partir de las hojas de caña de azúcar es una revolución para la industria papelera, ya que estas siempre han sido un residuo quemado; pero hoy en día se ha visto este nuevo uso muy beneficioso tanto para el medio ambiente como para el ser humano.

2.3.2.1. Ventajas y desventajas de las fibras no madereras

2.3.2.1.1. Ventajas

Las plantas de este tipo pueden crecer frecuentemente en zonas incapaces de soportar a los árboles, con lluvias muy reducidas y terrenos de baja calidad. En general, producen una cosecha anual con tonelajes que oscilan desde un límite inferior de 1 a 2 t/a (2.2 a 4.4 TM/ha) hasta un máximo de 8 a 10 t/a (18 a 22 TM/ha). El límite alto sobrepasa el crecimiento anual de cualquier especie de árbol, con la posible excepción de los árboles en rotación muy intensiva, cultivados en un pequeño bosque, tales como el sicomoro o el chopo⁴³.

En general, las plantas no leñosas se pueden cosechar después de un año o dos de una plantación, lo que se compara con los 10 o 20 años necesarios para lograr que los árboles alcancen el tamaño adecuado para su cosecha comercial.

Los campos de paja se pueden cosechar con facilidad; en general, no se requiere maquinaria especializada para su cosecha y su transporte.

Si la paja aparece como producto secundario, el costo total de la producción se comparte con el de la cosecha principal, y el costo de la paja para la fábrica de pulpa no será excesivo.

Muchas pajas se convierten en pulpa y se blanquean con facilidad, ya que no están fuertemente lignificadas, por lo que lo breve de los periodos que demandan en los procesos químicos contribuye a darles su atractivo. La

mayoría de las pulpas de paja requieren poca refinación antes de producir papel, por lo que resultan muy adecuadas para aquellos papeles en que no se requiere elevada resistencia⁴³.

En general, la pulpa blanqueada de paja es excelente como pulpa de relleno en la producción de papeles finos, para mejorar su suavidad, su formación, y contribuir a sus características favorables a la impresión o escritura, en tanto que las pulpas semiquímicas de paja son un medio corrugante de alta calidad.

2.3.2.1.2. Desventajas

Aun cuando la cosecha se lleva a cabo anualmente, debe realizarse durante un breve período, limitado habitualmente a pocas semanas en verano u otoño de cada año. Esto supone una inversión cuantiosa en maquinaria para la cosecha, mucha de la cual permanece ociosa durante el resto del año⁴³.

Las pajas tienden a ser voluminosas, lo que complica los problemas de transporte y almacenaje.

La paja es muy susceptible a la degradación microbiológica, sobre todo cuando está húmeda, y esta degradación puede destruir el potencial de la paja en cuanto a la producción de pulpa en el transcurso de solo pocos días, en tanto que transcurren semanas y meses para la degradación de la madera en un estado semejante.

En general, las fibras de las pulpas de paja son mucho más cortas que las fibras de las maderas suaves y tienden a purgar lentamente el agua. Esto disminuye la rapidez de producción durante las operaciones de lavado y de eliminación del agua en las fábricas de pulpa y blanqueo, y puede también reducir el funcionamiento de las máquinas para el papel.

Muchas pajas contienen cantidades sustanciales de sílice; si la producción de pulpa se realiza con licores fuertemente alcalinos (procesos a la sosa o kraft) la sílice se disolverá en el licor de producción de pulpa y volverá a precipitarse en el equipo de procesado durante las operaciones de recuperación del licor. Los tubos del evaporador pueden ser taponados, y la rapidez de asentamiento del lodo de cal perturbados gravemente por razón de la presencia de la sílice⁴³.

2.3.2.2. Pulpeo a la soda

Los dos principales procesos alcalinos que se utilizan en la producción de pulpa de madera son los procesos a la sosa y al sulfato. En ambos, el principal producto químico (licor blanco) para la cocción es el hidróxido de sodio; en el proceso al sulfato interviene también el sulfuro de sodio. La producción de pulpa a la sosa es el más antiguo de los procesos, pero se utiliza solo en ocasiones.

Las propiedades de resistencia de las pulpas producidas mediante los procesos a la sosa y al sulfato muestran sólo diferencias marginales en el

caso de los materiales fibrosos no leñosos, excepto el bambú, en forma especial cuando ha de blanquearse la pulpa.

2.3.2.2.1. Descripción del proceso en una fábrica de producción de pulpa alcalina

Se cargan las astillas y el licor al digestor bien sea intermitente o continuo. El licor blanco se carga para dar la relación correcta de productos químicos a madera, y, en el caso de los digestores intermitentes, el licor negro recirculado procedente de los lavadores se agrega también para alcanzar la relación deseada licor/madera. El digestor se calienta por vaporización directa o indirecta hasta llegar a una temperatura alta, en el margen de 160 a 180°C, y se mantiene allí hasta alcanzar el grado deseado de cocción. Después de terminada la digestión, las astillas cocidas y el licor gastado se descargan en un tanque de soplado. Las partículas no cocidas de mayor tamaño (nudos) se eliminan entonces utilizando cribas perforadas (nuderías) y separa de la pulpa mediante un lavado en contracorriente. A continuación, la pulpa se diluye hasta llegar a una consistencia baja, y se eliminan los contaminantes de pequeño tamaño mediante cribas finas, bien sea el tipo centrífugo o por presión, lo que en algunos casos se prosigue mediante limpiadores centrífugos. El material ya limpio se espesa a continuación y se almacena para subsecuente procesado⁴⁴.

2.4. Caracterización de la materia prima

Para la elaboración de pasta de celulosa y de papel es determinante conocer las propiedades físicas, morfológicas y químicas de la materia prima a usar, ya que de éstas depende directamente su calidad.

Dentro de las investigaciones realizadas, las propiedades que se evalúan, involucran dos tipos de parámetros: aspectos apreciables a simple vista y medidos con facilidad, como diámetro, grosor y densidad; y aspectos evaluados en laboratorio como contenido de humedad y la caracterización química, basados en las normas de la Asociación Técnica de la Industria de Pulpa y Papel de Estados Unidos (TAPPI) ⁴⁵, entre otros.

Asimismo, la composición química indica el porcentaje de rendimiento teórico a obtener durante el proceso de transformación a pulpa, además de la cantidad de agentes químicos para su tratamiento⁴⁶.

2.5. Influencia de las propiedades físicas y morfológicas de la materia prima sobre la pulpa

Los problemas de las industrias de celulosa comienzan con la elección de cierto tipo de fibras que aseguren las propiedades de resistencias y ópticas requeridas por la pulpa, puesto que sus características se reflejarán en la mejor o peor calidad de la hoja⁴⁷.

Las evaluaciones tratan de determinar a través de las características anatómicas de las fibras, la aptitud que tendrían al ser utilizadas finalmente para la elaboración de papel. Las características a las que se refiere la evaluación de la aptitud papelera son las siguientes⁴⁷:

2.5.1. Características Individuales:

2.5.1.1. Longitud de fibra:

La longitud de las fibras es importante en las propiedades de resistencia del papel, ya que por ejemplo la resistencia al rasgado de una hoja de papel se determina casi totalmente por el largo de sus fibras, guardando esta resistencia una correlación lineal con la longitud de las fibras, la resistencia al dobléz también se incrementa al aumentar la longitud de las fibras. Otro aspecto importante es la superficie dispuesta para la unión entre fibras, donde la resistencia a la tensión aumenta al aumentar el área de contacto entre ellas⁴⁸.

2.5.1.2. Diámetro de fibra y diámetro de lumen

Los diámetros de las fibras juegan un papel importante en la rigidez, flexibilidad y área de contacto entre ellas. Estos aspectos se reflejan en la formación de la hoja de papel, así como en su resistencia y textura; ello debido a que los elementos de paredes gruesas se mantienen casi en

forma tubular, siendo menos flexibles además de propiciar una menor área de contacto. Con las fibras de paredes delgadas, sucede lo contrario, ya que son más flexibles y se comportan como listones, generando una mayor área de unión entre ellas, dando como resultado un papel más resistente⁴⁹.

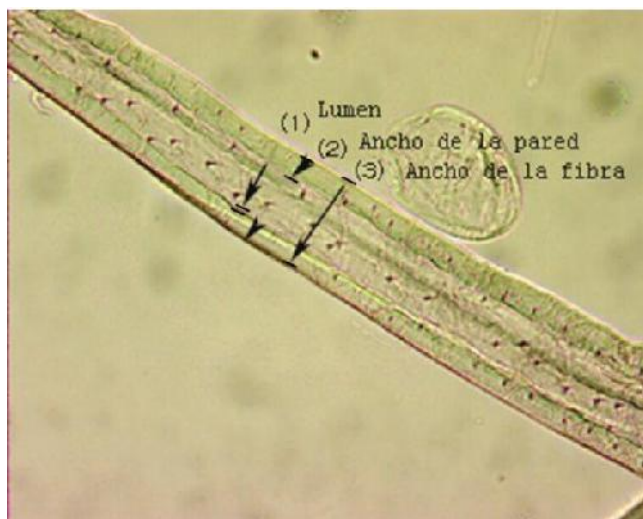


Figura 7. Propiedades Biométricas de la Fibra. Recuperado de “Comportamiento pulpable de Eucalyptus Nitens normal y suprimido crecido en la X Región de Chile”. Borgoño, A. 2006. (Tesis de pregrado).⁵⁰

2.5.1.3. Grosor de pared celular

El grosor de la pared celular es otra característica de suma importancia, ya que fibras con paredes delgadas tienden a colapsarse más fácilmente formando listones al producirse el papel. Por otro lado, las fibras de paredes gruesas por no colapsarse fácilmente, promueven poca superficie de contacto y por lo tanto crean una unión débil, de modo que el papel formado así es voluminoso, de baja resistencia a la tensión, explosión y rasgado⁴⁹.

2.5.1.4. Densidad

La densidad de la materia prima es considerada como una de las propiedades físicas más importantes debido a la relación que tienen con otras propiedades y con la utilización de la misma. En general, mayores valores de densidad se encuentran asociados a mayores resistencias mecánicas y mayores valores energéticos; esto debido a que la densidad o peso específico están relacionados directamente con el contenido de celulosa⁵¹.

Las fibras de las hojas de caña de azúcar son muy importantes, pero la materia prima fundamental para fabricar papel es la holocelulosa (celulosa y hemicelulosas). Las fibras de celulosa son un constituyente esencial de los tejidos vegetales, cuya función es la de dar resistencia a los mismos⁵².

La fibra es un material vegetal que desde sus inicios se extraía de plantas como el algodón, la cebada, el lino, etc. A partir del siglo XIX, se comenzó a usar la madera que es el material de celulosa de mayor importancia en la actualidad pero se están haciendo investigaciones sobre alternativas que puedan reemplazarla. En consecuencia, cualquier compuesto que contenga celulosa, lignina, hemicelulosa, etc. en un porcentaje adecuado, puede ser útil para la fabricación del papel⁵².

2.6. Influencia de las propiedades químicas de la materia prima sobre la pulpa

Las propiedades químicas de estas fibras tienen un rol importante en la calidad del producto, por lo que es necesario conocer de qué manera influyen en el proceso de fabricación de papel.

2.6.1. Celulosa

Materias primas con potencial para la producción de papel deben tener valores de celulosa por encima de 40%. Klass (1998), se reportaron valores por encima del 40% en sus investigaciones, es decir que estas fibras están en valores cercanos a maderas blandas y duras⁵³.

2.6.2. Lignina

Otro resultado importante a considerar es la lignina porque es necesario reducirla en el proceso de elaboración de papel para que las fibras se puedan adherir y formar la hoja, para eliminarla se necesitan procesos químicos especializados⁵³.

2.6.3. Solubilidad de extractivos

El porcentaje de solubilidad influye en el proceso productivo del papel porque hay residuos que se deshacen y facilitan la preparación de la pulpa, como hay residuos en los que hay necesidad de aplicar calor y si este no es suficiente se emplean procesos mecánicos y químicos para deshacer la fibra⁵³.

2.6.4. Hemicelulosa

La función principal es su interacción con la celulosa y lignina para proporcionar rigidez a la pared celular. Las cadenas de hemicelulosas se asocian con las microfibrillas de celulosa tras su carácter polar (puentes de hidrógeno). Su comportamiento físico-químico, principalmente su capacidad de enlace y su comportamiento visco-elástico, es de gran importancia para proporcionar propiedades deseadas como grado de hinchamiento, (re)hidratación, plasticidad, flexibilidad, rigidez, dureza, etc. durante el proceso de fabricación de papel⁵⁴.

2.7. Consideraciones de la calidad de la pulpa de celulosa

Para determinar la calidad de la pulpa de celulosa es importante conocer las propiedades físicas de las fibras de la materia prima, ya que de ella depende que el papel tenga o no elevada densidad, gran resistencia a la

fuerza de tensión, de explosión y de rasgado, así como al paso del agua y del aire, lo mismo que buenas propiedades para la escritura e impresión⁵⁵.

Se esperaría entonces, producir una pulpa de buena calidad con aquellas materias primas que presentan un valor alto en el coeficiente de flexibilidad y valores bajos en el índice de rigidez, en el coeficiente de Peteri y en la relación de Runkel. Esto coincide con Wangaard y Britt, cuando establecen que al aumentar el diámetro del lumen de las fibras se presenta una reducción en el grosor de las paredes, es decir en la rigidez, provocando aumento en la flexibilidad de la fibra y a la vez una mayor tendencia al desarrollo de uniones entre las fibras⁵⁵.

A partir de la medición biométrica de las fibras: largo de fibra, diámetro de fibra y lumen y grosor de la pared celular, se calculan los índices de calidad de las pulpas:

2.7.1. Coeficiente de flexibilidad

El coeficiente de flexibilidad (Tabla 6) guarda una relación parabólica con la longitud de rompimiento y al ser el coeficiente más alto, la resistencia a la tensión será mayor, y la resistencia al rasgado y al dobléz en pulpa sin refinar se verán favorecidas por el incremento del coeficiente de flexibilidad⁵⁶.

Tabla 6*Clasificación del coeficiente de flexibilidad*

RANGO	GROSOR DE PARED	CARACTERÍSTICAS
menor de 0.30	Muy gruesa	Las fibras no se colapsan. Muy poca superficie de contacto. Pobre unión fibra-fibra
de 0.30 a 0.50	Gruesa	Las fibras se colapsan muy poco. Poca superficie de contacto. Poca unión fibra-fibra.
de 0.50 a 0.65 de 0.65 a 0.80	Media Delgada	Abarca lo anterior. Fibras parcialmente colapsadas, con una sección transversal elíptica. Buena superficie de contacto. Buena unión fibra-fibra.
mayor a 0.80	Muy delgada	Las fibras se colapsan. Buena superficie de contacto. Buena unión fibra-fibra.

Nota. Recuperado de “Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas”. Tamarit, J. 1996. Rev. Maderas y bosques.

2.7.2. Coeficiente de rigidez

Este coeficiente influye de manera notoria en la resistencia al rasgado, siendo ésta una de las características más importantes en pulpas sin batir. Presenta además, una relación negativa en la porosidad de la hoja⁵⁷. Se puede observar sus rangos en la Tabla 7.

Tabla 7*Clasificación del coeficiente de rigidez*

RANGO	GROSOR DE PARED
mayor de 0.70	Muy gruesa
de 0.70 a 0.50	Gruesa
de 0.50 a 0.35	Media
de 0.35 a 0.20	Delgada
menor de 0.20	Muy delgada

Nota. Recuperado de “Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas”. Tamarit, J. 1996. Rev. Maderas y bosques.

2.7.3. Relación de Runkel

Cuanto menor es la relación largo/ancho mayor es la flexibilidad de las fibras y mayor la posibilidad de producir papel de buena calidad. Cuando este índice es mayor que la unidad, las maderas no son susceptibles para la producción de papel de buena calidad⁵⁸. Se puede observar sus rangos en la Tabla 8.

Tabla 8
Clasificación de Runkel

GRADO	RANGO	CLASIFICACIÓN
I	menos de 0.25	Excelente
II	de 0.25 a 0.50	Muy buena
III	de 0.50 a 1.00	Buena
IV	de 1.00 a 2.00	Regular
V	mayor de 2.00	Mala

Nota. Recuperado de “Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas”. Tamarit, J. 1996. Rev. Maderas y bosques.

2.7.4. Coeficiente de Peteri

El coeficiente de Peteri o índice de esbeltez representa la posibilidad de aumentar el contacto fibra a fibra lo que favorece la correlación entre las propiedades de las pulpas obtenidas a partir de mediciones de elementos fibrosos⁵⁹.

Dentro de las propiedades físicas de la madera, la densidad es una de las más importantes, ya que determina el valor y la utilidad de la misma, y está

fuertemente correlacionada con otras propiedades como la resistencia mecánica, la rigidez, la conductividad térmica y el calor específico⁶⁰.

También se evalúa la calidad de la pulpa con relación a la influencia de la proporción de lignina, celulosa y hemicelulosa, en donde un alto contenido de lignina disminuye la calidad y dificulta el proceso de blanqueo, afectándose su rendimiento, en tanto que una mayor proporción de celulosa, influye en una mejor calidad con rendimientos elevados. Por su parte, un alto contenido de hemicelulosas contribuye en mucho a la resistencia a la tensión, explosión y doblez de la hoja de pulpa, aunque para un tipo específico de papel, existe a menudo un contenido óptimo de hemicelulosas⁶¹.

2.8. Impacto ambiental

Hoy en día es muy importante estar en armonía con nuestro medio ambiente, ya que es vital para la supervivencia de los seres vivos, es por ello que hay concientización para realizar un trabajo teniendo en cuenta en qué se puede ayudar para mitigar problemas graves como el calentamiento global, muerte de especies, enfermedades, etc. Así como también en mencionar los factores negativos del trabajo para que se le dé una buena solución en otras posibles investigaciones.

El objetivo fue usar materiales de desecho para evitar la contaminación y usarlo para un buen fin, pensando en la comunidad Lambayecana, ya que

vive afectada por la contaminación de las industrias azucareras, e ahí el primer aporte.

2.8.1. Quema de la caña de azúcar

La quema de los campos cultivados cuando van a ser recolectados, es una práctica utilizada para facilitar la visibilidad, a la hora de cortar la caña, ya que se eliminan las hojas secas y la paja, evitando el deshoje manual y por tanto reduciendo la mano de obra campesina. De igual manera se reducen los accidentes por picaduras de víboras o alacranes.

Los resultados de la práctica de quemas son de diversa naturaleza y merecen a la vez opiniones diferentes. Estas prácticas están teniendo graves consecuencias tanto ambientales como para la salud y la economía de las personas.

Al quemar la caña de azúcar, como actividad previa a la cosecha, se presentan una serie de problemas ambientales como es la contaminación del aire aumentando los índices de emisiones de gases a la atmósfera⁶¹, como lo son:

- 2.8.1.1. Monóxido de nitrógeno: tiene efectos tóxicos sobre los humanos.
- 2.8.1.2. Anhídrido sulfuroso: Al unirse con el agua atmosférica forma la llamada lluvia ácida.
- 2.8.1.3. Anhídrido carbónico: En reacción fotoquímica produce irritación en los ojos y afecta las vías respiratorias.

2.8.1.4. Monóxido de carbono, hidrocarburos, óxido de azufre⁶³.

Estos gases provocan el efecto invernadero, pero no tan sólo el aire es afectado a la hora de la quema de la caña si no también el suelo, por la pérdida de fertilidad, ya que la quema hace que se pierda materia orgánica lo que provoca su esterilización. Además se promueve su erosión debido a que el fuego al eliminar la materia extraña acaba con la cubierta vegetal. Así mismo se destruye la superficie donde se encuentra la lombriz de tierra, la que es beneficiosa pues ventila la tierra facilitando la penetración del agua evitando inundaciones, este hecho puede ser malo para los campos ya que juega un papel muy importante en la preservación de la tierra en la que se va a cultivar la caña de azúcar⁶².

De igual manera la ceniza y el humo generado afecta a los animales, a la vez que contamina ríos y lagos cercanos a la quema⁶¹. Dicha ceniza y humo producen dificultades en la visibilidad, lo que se torna sumamente peligroso en el caso de carreteras o aeropuertos cercanos al lugar de la quema. Por otra parte, esas cenizas contienen un alto contenido de potasio que en presencia de agua tiene un alto poder corrosivo sobre superficies metálicas. El transporte de las cenizas ocurre de la siguiente manera, cuando la temperatura del aire próximo al suelo es mayor al que se encuentra en capas superiores de la atmosfera se producen corrientes de aire ascendentes que elevan las cenizas a gran altitud donde son arrasadas por corrientes horizontales alcanzando hasta 50 km a la redonda del origen de la quema⁶².

También existe el problema con las personas que cortan la caña ya que por estar expuestas a altas temperaturas sufren además de quemaduras deshidratación, lo que les provoca infecciones urinarias. La inhalación de partículas irritantes puede interferir principalmente el funcionamiento pulmonar, agravando la bronquitis crónica, la enfermedad constrictiva ventilatoria crónica, el enfisema pulmonar y el asma bronquial. El factor determinante en el efecto en salud es el tamaño de las partículas. Afectando a la población colindante y en especial, a los menores⁶¹.

Al disponer de fuentes alternativas de materias primas para la producción de pasta de celulosa, se puede minorar la utilización y explotación de los árboles; así se evita muchas de las consecuencias negativas que trae consigo la tala.

2.8.2. Tala indiscriminada de árboles

Una de las razones de la drástica reducción de los bosques mundiales, con la consiguiente disminución de la biodiversidad, hay que buscarla en el incremento de la demanda de fibras de celulosa para satisfacer las necesidades de la industria papelera. El consumo mundial de papel excede las 268 millones de toneladas al año. El rápido y sostenido crecimiento de la demanda de productos de papel ha ido de la mano de una mayor escasez en la provisión de madera, provocando la desaparición de bosques nativos con los consecuentes impactos sobre los ecosistemas que forman parte de

ellos. Estados Unidos, Japón y China, los tres principales productores de papel en el mundo, utilizan anualmente 600 millones de árboles para sus fábricas. El uso generalizado de la madera provocó la expansión de las plantaciones forestales de especies de crecimiento rápido. De esta forma, extensas zonas de bosques originales han desaparecido del globo, para dar paso a un monótono manto verde constituido por plantaciones de pino y eucalipto⁶⁴.

Las plantaciones, al igual que los bosques, están compuestas por árboles, pero ambas son radicalmente diferentes. Un bosque es un sistema complejo, que se autoregenera y que incluye suelo, agua, microclima, energía y una amplia variedad de plantas y animales en mutua relación. Una plantación comercial, por el contrario, es un área cultivada, cuyas especies y estructura han sido dramáticamente simplificadas para producir sólo unos pocos productos, ya sea madera, leña, resina, aceite o frutas. A diferencia de los bosques, en una plantación los árboles tienden a pertenecer a una reducida variedad de especies y edades y requieren de una constante y amplia intervención humana⁶⁵.

Algunos datos sobre la deforestación

1. En los últimos cincuenta años se ha perdido en el mundo una superficie de bosque equivalente a China y la India juntas.
2. La selva amazónica desaparece al ritmo de una cancha de fútbol por segundo. Si destacamos que este tipo de bosque alberga entre el 50 y

el 90% de la diversidad biológica del planeta, entonces nos haremos una idea de lo que supone su pérdida.

3. Por lo que respecta a Extremadura (España), en los años que van de 1950 a 1980, se perdieron la cuarta parte de los bosques de encinas, lo que equivale aproximadamente a unos nueve millones de árboles. Aunque ya está prohibido cortar encinas, la recuperación es difícil debido a las plagas, la sequía y el sobrepastoreo⁶⁶.

Además la falta de árboles trae consigo innumerables problemas como

1. Agudización de la sequía: Estamos padeciendo el período más seco del siglo. Debemos tener en cuenta que los bosques atraen la lluvia y que donde hay mucha vegetación aumenta la humedad ambiente, así como las reservas de agua en el subsuelo.
2. Veranos más calurosos: El árbol también conserva la humedad del suelo y regula el clima. Es decir: crea microclimas. La tierra sin árboles experimenta variaciones de temperatura y de humedad.
3. Vientos a lo largo del día y durante las diferentes estaciones mucho mayores que las superficies arboladas.
4. Inundaciones: el humus del suelo retiene el agua de lluvia y las raíces evitan que se vaya la tierra. Triste prueba de esto es que donde ha habido un incendio es probable que el año siguiente haya inundaciones.
5. Erosión: Aparte de impedir que el viento y el agua se lleven la tierra fértil, el árbol impide que el sol convierta el suelo en desierto, ya que la luz

está hecha para las hojas, no para el suelo, el cual se seca y agrieta. El suelo del bosque suele ser blando, mientras que donde no hay árboles es duro, como una costra.

El árbol es algo más que una fábrica de madera

1. Es el mejor captador solar: Aprovecha la energía del sol, que es una energía gratis y no contaminante.
2. Fertiliza el suelo: Los materiales inertes, los minerales, etc. son transformados en materia orgánica.
3. Él mismo se transforma en abono (hojas, frutos, raíces y todo él cuando muere).
4. Da alimento y escondite a los animales del bosque. Sin embargo, no todos los árboles son igual de beneficiosos. Son preferibles las especies autóctonas de cada sitio, porque en virtud de la selección natural son las mejor adaptadas a cada ecosistema. En el Perú, siempre en función de la rentabilidad económica, pero no ambiental, se han plantado en las últimas décadas, especialmente en la sierra y de forma masiva dos especies que son altamente dañinas para el suelo: El pino y el eucalipto⁶⁶.

El proceso de obtención de pulpa de celulosa no solo necesita cambiar sus fuentes de materia prima, sino también cómo se transforma ésta. Por eso hay que mencionar qué otras consecuencias trae consigo nuestro proceso estudiado.

2.8.3. Contaminantes de la industria pastero-papelera

Cuando se estudia la contaminación producida por la industria de la pasta y el papel, hay que tener en cuenta su incidencia en los diferentes medios: agua, aire y suelo⁶⁷.

En el proceso de reducción se genera una gran cantidad de residuos de fibra de celulosa, los que al ser depositados en los cuerpos de agua, generan un exceso de materia orgánica. Aunque son biodegradables crean graves problemas al sepultar los fondos acuáticos, ya que consumen grandes cantidades de oxígeno en su proceso de degradación, reduciendo la probabilidad de vida acuática⁶⁸.

Los componentes sólidos pueden ocasionar la formación de sedimentos en las partes bajas de los ríos.

Entre los efectos en el medio destacan

1. Cubren los lechos de los ríos y alteran la vida béntica existente.
2. Requieren de los recursos de oxígeno del río.
3. Su descomposición anaerobia produce olores desagradables.
4. La descomposición anaerobia produce gases que hacen flotar sólidos del lecho.

Este tipo de sedimentos pueden clasificarse en tres

1. Sólidos disueltos, entre los de origen orgánico lignina y derivados, hidratos de carbono, ácidos y alcoholes.

2. Sólidos en suspensión, constituidos por cortezas, residuos de fibras, cenizas, cal, etc.⁶⁷
3. La adición de agua que contiene energía térmica a un río hará que se produzcan desequilibrios de temperatura en los mismos, siendo los efectos más notables:

- 3.1. El aumento de la actividad metabólica de los organismos.
- 3.2. Una mayor demanda en cuanto a los recursos de oxígeno.
- 3.3. Una disminución de la solubilidad del oxígeno.
- 3.4. Choques térmicos en peces.
- 3.5. Desplazamiento de los organismos presentes.

Estos efectos van a conllevar una tendencia hacia un estado de eutrofia en el río con desaparición de la vida piscícola. La EPA (Environmental Protection Agency) recomienda una temperatura máxima en el receptor de agua de 32°C y una elevación máxima por encima de la natural de 5°C⁶⁷.

El suelo también es susceptible de ser contaminado, se produce como consecuencia de los derrames y vertidos que se producen en el proceso productivo y consecuencia de este⁶⁷.

2.9. Diseño factorial tres niveles: 3³

Es un método de superficie de respuesta que permite el modelado y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe la

influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar esta respuesta.

El objetivo de la optimización es determinar el nivel óptimo de cada variable independiente usando técnicas de optimización de superficie de respuesta.

El siguiente modelo polinomial cuadrático representa la relación entre tres variables:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2$$

Donde Y es la variable dependiente (tal como el rendimiento); x_1 , x_2 y x_3 son las variables independientes; b_0 es el coeficiente de regresión del punto central; b_1 , b_2 y b_3 son los coeficientes lineales; b_{12} , b_{13} y b_{23} son los coeficientes de interacción de segundo orden; y b_{11} , b_{22} y b_{33} son los coeficientes cuadráticos. Determinando la interacción lineal y los efectos cuadráticos de las variables se puede generar un mapa o un gráfico de contorno⁶⁹.

Este diseño implica cinco niveles de cada variable experimental. Diseños más simples pueden realizarse usando solamente tres niveles de por cada variable, un nivel bajo (-), nivel central (0), y un nivel alto (+). Los diseños factoriales a tres niveles generan corridas en cada combinación de estos tres niveles. Con 3 variables experimentales se obtienen 27 corridas, como se presentan en la hoja de trabajo⁷⁰:

Tabla 9*Diseño factorial tres niveles - 3³*

Corrida	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	0	-1	-1
3	1	-1	-1
4	-1	0	-1
5	0	0	-1
6	1	0	-1
7	-1	1	-1
8	0	1	-1
9	1	1	-1
10	-1	-1	0
11	0	-1	0
12	1	-1	0
13	-1	0	0
14	0	0	0
15	1	0	0
16	-1	1	0
17	0	1	0
18	1	1	0
19	-1	-1	1
20	0	-1	1
21	1	-1	1
22	-1	0	1
23	0	0	1
24	1	0	1
25	-1	1	1
26	0	1	1
27	1	1	1

Nota. Recuperado de STATGRAPHICS Centurion XVI Manual.

Una vez que se ha corrido todas las pruebas, se calculan los coeficientes de modelo polinomial usando técnicas de regresión estándar. Existen muchos programas de computación adecuados para realizar estos análisis, en este caso se utilizó el STATGRAPHICS Centurion XVI.I. Las ecuaciones calculadas se pueden usar para efectuar predicciones a cualquier combinación de los factores o se pueden generar graficas de contorno a

distintos niveles de las variables. Estas graficas pueden indicar la ubicación de la respuesta óptima o sugerir la región sobre la cual se hallaría esta⁶⁹.

Este diseño posee algunas ventajas:

2.9.1. Son más eficientes que los experimentos de un factor a la vez.

2.9.2. Los diseños factoriales son necesarios cuando alguna interacción puede estar presente, para evitar hacer conclusiones engañosas.

2.9.3. Los diseños factoriales permiten estimar los efectos de un factor en diversos niveles de los otros factores, produciendo conclusiones que son válidas sobre toda la extensión de las condiciones experimentales⁷¹.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

3.1.1. Muestra

Se cortaron y recolectaron hojas de la planta de caña de azúcar (variedad CH-37 y 8 meses de edad) en los campos de cultivo de caña de azúcar en el distrito de Tumbán, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque. Luego se trasladaron al Laboratorio de Físico-Química de la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo en donde se efectuó el proceso para la formación de pulpa de papel.

Se recogieron 200 gramos de hojas de caña de azúcar, que fue una cantidad suficiente para efectuar las evaluaciones necesarias. Para las 27 combinaciones (tabla 10), que dio como respuesta el programa estadístico, se utilizaron muestras de 5 gramos de hojas de caña de azúcar anhidra y soluciones de Na(OH) en diferentes concentraciones.

Tabla 10

Combinación variables en la obtención de pulpa para la fabricación de papel a partir de hojas de caña de azúcar

Tiempo	Concentración	Tamaño de partícula
Horas	%Na(OH)	Cm
1	5	0.1
1.5	5	0.1
2	5	0.1
1	10	0.1
1.5	10	0.1
2	10	0.1
1	15	0.1
1.5	15	0.1
2	15	0.1
1	5	0.5
1.5	5	0.5
2	5	0.5
1	10	0.5
1.5	10	0.5
2	10	0.5
1	15	0.5
1.5	15	0.5
2	15	0.5
1	5	2
1.5	5	2
2	5	2
1	10	2
1.5	10	2
2	10	2
1	15	2
1.5	15	2
2	15	2

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

3.1.2. Equipos

3.1.2.1. Reactor de deslignificación

Se utilizó una estufa con controlador de temperatura. Para el control del tiempo se utilizó un cronómetro.

3.1.2.2. Molino

Para la obtención del tamaño de partícula deseado se usó una licuadora.

3.1.2.3. Equipo de secado

Se empleó una estufa luego de la deslignificación para acondicionar la muestra antes del control de calidad.

3.1.2.4. Equipos para caracterización de muestra y control de calidad

Se utilizaron variedad de equipos para estas áreas, los cuales están descritos en cada evaluación.

3.1.3. Reactivos

Para el proceso de pulpeo se utilizó hidróxido de sodio al 98% de pureza, de uso comercial en escamas y para la caracterización y control de calidad se utilizaron una variedad de reactivos, los cuales están descritos en cada evaluación.

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Caracterización de la materia prima (Hojas de caña de azúcar)

La caracterización de la materia prima es muy importante ya que nos brindó la información necesaria de su composición química, ésta nos ayudó a saber exactamente la cantidad de ciertos elementos que brindan características relevantes.

La preparación de la muestra y determinación de la composición de las fibras se llevaron a cabo de acuerdo con lo descrito en las normas TAPPI, ASTM, entre otras.

3.2.1.1. Preparación de la muestra para Análisis Químicos

Los disolventes neutros, etanol y benceno, se emplean para eliminar materiales que no forman parte de la composición de la madera o que pueden interferir con algún análisis.

Los extractivos de madera son materiales solubles en disolventes neutros y generalmente no se consideran parte de la composición de la madera. Estos materiales deben eliminarse antes de cualquier análisis químico de la sustancia de madera, excepto cuando el proceso de extracción y el posterior lavado puedan interferir con ciertos análisis químicos. El etanol-benceno se utiliza para extraer ceras, grasas, algunas resinas, y posiblemente algunas porciones de gomas de madera. El agua caliente se utiliza para extraer taninos, encías, azúcares, almidones y colorantes.⁷²

3.2.1.1.1. Determinación del contenido de extraíbles solubles en agua a 95°C. Según Norma TAPPI 207⁷³

Materiales

1. Estufa
2. Matraz
3. Calentador
4. Condensador
5. Filtros

Procedimiento

El contenido de sustancias solubles en agua a 95 °C se realiza colocando la muestra de 4 g, con 100 ml de agua destilada y se refluja durante tres horas, se filtra el residuo, se seca en estufa 103 ± 2°C hasta peso constante.

Cálculos

$$\%Solubles = \frac{P}{W} \times 100$$

Donde

P = Peso perdido durante la determinación.

W = Peso de la muestra

3.2.1.1.2. Determinación de extraíbles orgánicos. Según Norma TAPPI 204⁷⁴

Materiales

1. Papel filtro
2. Aparatos de extracción, con junta esmerilada. Una forma compacta del aparato Soxhlet es preferible.
3. Lunas de reloj
4. Dispositivo de calefacción, baño de vapor o manta de calentamiento.
5. Campana para sustancias químicas

Reactivos

1. Etanol al 96%
2. Benceno puro
3. Mezcla de etanol-benceno, 1/3 de etanol y 2/3 de benceno

Procedimiento

1. Obtener una muestra representativa de pulpa secada de 4 gramos en el cartucho de extracción tarado.
2. Colocar el cartucho de extracción en el aparato de extracción Soxhlet limpio y seco. Conectar el aparato de extracción Soxhlet en posición vertical a un matraz de extracción de fondo redondo limpio y seco.
3. Llenar el matraz de extracción con 150 ml del disolvente requerido.

4. Conectar el matraz al aparato de extracción e iniciar el flujo de agua a la sección del condensador. Ajustar los calentadores para proporcionar una velocidad de ebullición que se desplazará por las muestras de no menos de 24 extracciones durante un período de 4 a 5 horas.
5. Retirar el matraz del aparato. Transferir la muestra a la placa de pesaje tarado, lavándolo con pequeñas cantidades de disolvente fresco. Manejar el plato de pesaje con unas pinzas o tenazas. El disolvente se evapora casi hasta sequedad, en la campana de humos química.
6. Secar la cápsula y su contenido en un horno durante 1 hora a $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$, enfriar en un desecador y pesar con precisión de 0.1 mg.

Cálculos

$$\%Extraibles: \left[\frac{W_e - W_m}{W_e} \right] \times 100$$

Donde:

W_e : Peso de la muestra

W_m : Peso de la muestra final

3.2.1.2. Determinación de Compuestos Químicos

3.2.1.2.1. Determinación de humedad. Según Norma TAPPI 264⁷⁵

Materiales

1. Estufa u horno
2. Balanza eléctrica

3. Botellas de pesaje

Procedimiento

1. Pesar una muestra de 2 g (A) en una botella de pesaje tarada.
2. Secar durante 2 h en un horno a 105 ± 3 ° C, enfriar en un desecador, volver a colocar el tapón y abrir el tapón momentáneamente para igualar la presión de aire y pesar.
3. Regrese la botella al horno durante 1 h.
4. Repetir el enfriamiento y el pesaje hasta que se alcance el peso constante (B), es decir, hasta que las pesadas sucesivas no cambien en más de 0.002 g.

Cálculos

Calcular el porcentaje de humedad en la madera al 0,1% más cercano.

$$\text{Contenido de humedad, \%} = \frac{(A - B)}{A} \times 100$$

Donde A y B son los pesos de la muestra después de restar el peso de las botellas de muestra.

3.2.1.2.2. Determinación de celulosa y lignina por permanganato⁷⁶

Materiales

1. Fuente de vidrio de profundidad de 3 a 4 cm
2. Crisoles con filtro
3. Bagueta

4. Probeta
5. Estufa
6. Mufla
7. Cronómetro
8. Balanza analítica
9. Desecador

Reactivos

1. Permanganato de Potasio Saturado
2. Permanganato de Potasio
3. Sulfato de Plata
4. Agua destilada

Solución Buffer

Cloruro férrico nonahidratado

Nitrato de plata

Acetato de potasio

Ácido acético

Alcohol absoluto

Agua destilada

Solución desmineralizante

Ácido oxálico deshidratado

Alcohol etílico

Ácido clorhídrico

Agua destilada

Alcohol etílico al 80%

Para el contenido de lignina

Procedimiento

1. Pesar 1 g de pulpa seca.
2. Colocar los crisoles que contienen la muestra en una bandeja de una profundidad de 3 a 4 cm., luego agregar una lámina de 1.5 a 2 cm. de agua de caño. La fibra de los crisoles no se debe mojar con el agua.
3. Agregar a los crisoles 25 ml aproximadamente de solución combinada (permanganato de potasio saturado más solución buffer), ajustar el nivel del agua en la bandeja a manera de reducir la corriente de paso de la solución a través de los crisoles. Colocar una bagueta de vidrio en cada crisol con el objeto de mezclar su contenido, disolver los grumos y bañar todas las partículas que se adhieren a las paredes internas del crisol, con la solución de permanganato.
4. Los crisoles deben permanecer 90 minutos. Hay q recordar que el color morado lo debe conservar constantemente.
5. Filtrar toda la porción líquida remanente. No se lave la muestra y regresarlas a la bandeja.

6. Luego agregar a cada crisol 20 a 25 ml² de solución desmineralizante y agitar hasta que la fibra tome un color blanquecino, el tiempo que debe estar con este tratamiento debe ser de 40 a 50 minutos.
7. Filtrar el contenido de los crisoles y lavar la muestra con alcohol etílico al 80%, repetir esta acción 2 o 3 veces.
8. Llevar los crisoles a estufa a 105°C durante una noche.
9. Pesar el residuo.

Cálculos

El porcentaje de lignina se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$\%Lignina = \frac{(A - B)}{A} \times 100\%$$

Donde:

A: Peso de la muestra

B: Peso del residuo en tratamiento de lignina

Para el contenido de celulosa

1. Llevar las muestras procedentes de la determinación de lignina a la mufla a 500°C por un espacio de 4 a 5 horas.
2. Luego colocarlas en el desecador, dejar enfriar y pesar la muestra.

Cálculos

$$\%Celulosa = \frac{(B - C)}{A} * 100$$

Donde:

A: Peso de la muestra

B: Peso del residuo en tratamiento de lignina

C: Peso del residuo en tratamiento de celulosa

3.2.1.2.3. Estimación del contenido de hemicelulosas totales⁷⁷

Las hemicelulosas totales se estiman por diferencia entre 100 % y la suma del porcentaje de celulosa y el porcentaje de lignina en madera libre de extraíbles.

3.2.1.2.4. Determinación de cenizas. Según Norma ANSI/ASTM D1102-56⁷⁸

Materiales

1. Crisoles de porcelana o sílica con capacidad de 30 ml (preferible) o más.
2. Mufla con pirómetro para mantener la temperatura.
3. Balanza analítica sensible a 0.1 mg.
4. Horno para secar y desecadora.
5. Pinzas de metal largas.

Procedimiento

1. Se calcinó un crisol, adecuado para 1g de muestra de madera, a 600 °C en una mufla durante 1 hora.

2. Luego se retiró e introdujo en una desecadora durante 15 min., para después tararlo. Se bajó la temperatura de la mufla por seguridad.
3. Se agregó 1g de muestra de madera en el crisol, previamente tamizada y seca.
4. Se agregó la muestra a la mufla aplicando 100 °C y luego se aumentó de modo que no hubiera ignición en la muestra. Se llegó a 600 °C sin pasarse de dicha temperatura.
5. Luego de hora y media se revisó la muestra, extrayendo el crisol con una pinza, de modo que el material sea solamente cenizas (color grisáceo blancuzco); de lo contrario se mantuvo la muestra más tiempo en la mufla.
6. Luego se llevó la muestra a una desecadora por 15 min. para luego ser pesada. Se repitió hasta peso constante

Cálculos

El porcentaje de cenizas se determinó por medio de la siguiente ecuación:

$$\%Cenizas = (P.B - P.T) * 100\%$$

Donde:

P.B. = Peso bruto.

P.T. = Peso tara.

Nota: La ecuación es válida si la muestra de madera utilizada es 1 gramo.

3.2.2. Proceso de obtención de pulpa de celulosa

Las hojas de caña de azúcar siguieron las siguientes etapas en el proceso de pulpeo: Cortado, molienda, tamizado, secado, mezclado, deslignificación y lavado/secado, las cuales serán descritas a continuación:

1. Acondicionamiento: Proceso desde que es recolectada en el campo hasta su lavado.
2. Cortado 1: Se utilizó tijeras para dar un tamaño homogéneo a las hojas.
3. Secado: Se secaron las hojas en una estufa a 105°C por dos horas.
4. Cortado 2: Los cortes fueron de aproximadamente 2 cm. y 0.5 cm. para obtener dos de los tamaños a estudiar.
5. Molienda: En la licuadora, se colocaron hojas secas para obtener el último tamaño a estudiar y se molieron hasta obtener el tamaño de 0.1 cm.
6. Tamizado: Las hojas molidas se pasan por un colador de abertura de 0.1 cm. para cerciorar que el tamaño sea el adecuado, lo que se quede en el colador pasa otra vez a molienda.
7. Mezclado: En un frasco de vidrio hermético se colocaron 5 gramos de muestra, y se adicionó la solución de Na(OH) en relación de 1/10 (sto/ste), sumergiendo bien las hojas en la solución para que el pulpaje sea uniforme.
8. Deslignificación: La mezcla de las hojas de caña de azúcar y la solución de Na(OH) ingresaron a la estufa a temperatura de 150°C y se controlaron los diferentes tiempos ya determinados.

9. Lavado-Secado: La muestra se lavó con agua destilada para quitarle la solución usada y los compuestos no deseados, después se secó en la estufa a 105°C por dos horas. Se procedió a pesar y se hicieron los cálculos necesarios.

En la figura 8 se detalla en un diagrama de bloques el proceso de obtención de pulpa de celulosa a partir de hojas de caña de azúcar, el mismo que se realizó a escala de laboratorio.

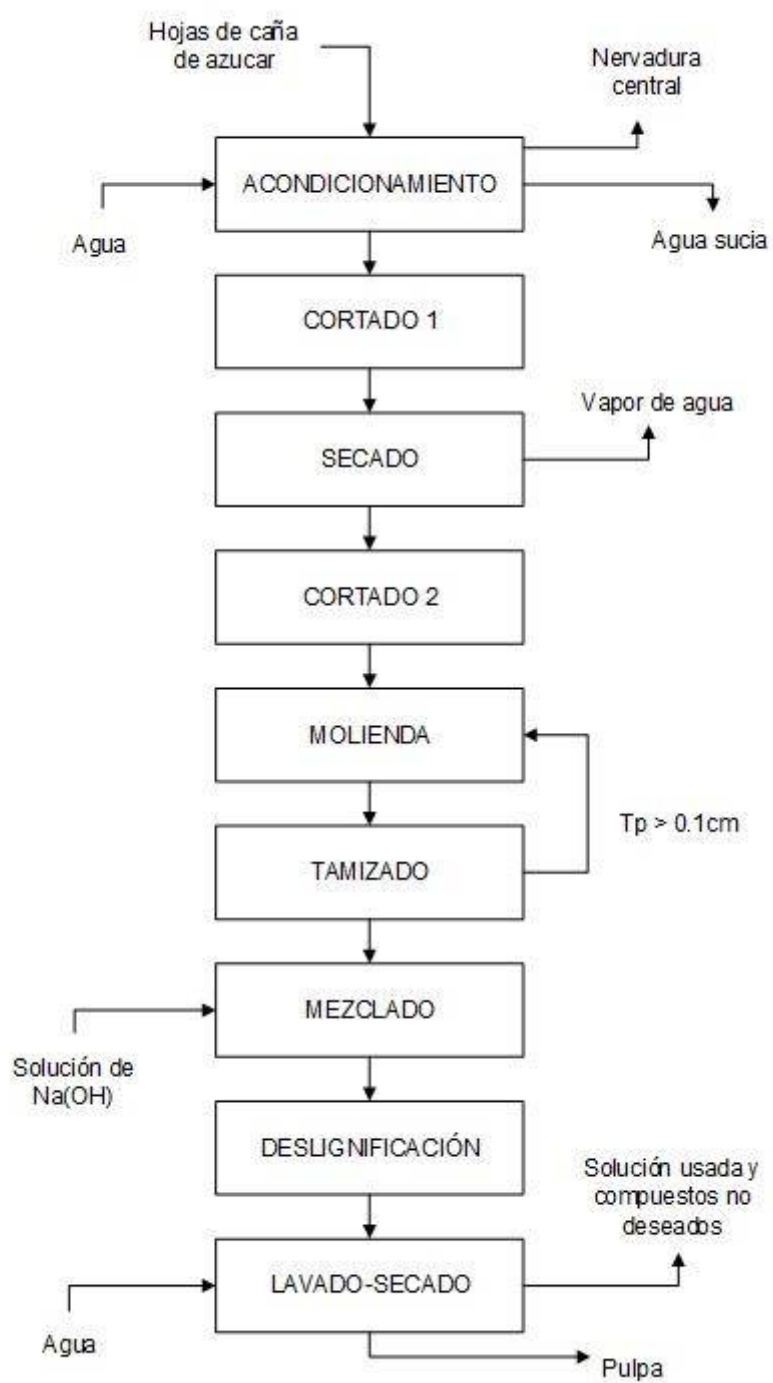


Figura 8. Diagrama de bloques de la obtención de pulpa a partir de hojas de caña de azúcar. Elaborado por los autores. 2017.

Luego de seguir el proceso, se obtuvo como resultado una pasta. Se tomaron evaluaciones de porcentaje de lignina y celulosa para el control de calidad de ésta.

Se analizaron tres variables en el proceso de pulpeo, se tomaron tiempos de cocción de 1; 1.5 y 2 horas, concentraciones de NaOH de 5, 10 y 15% y tamaño de partícula de 2; 0.5 y 0.1 cm.

3.2.3. Control de la calidad de la pulpa de celulosa

Para el control de calidad de la pulpa de celulosa se realizaron análisis físicos de las hojas de la caña de azúcar; además de análisis químicos (hechos anteriormente en la caracterización de la materia prima) a la pulpa para determinar el rendimiento del proceso.

3.2.3.1. Preparación de la muestra para análisis físicos en materia prima⁷⁹

Materiales

1. Microscopio binocular
2. Cámara para microscopio
3. Lámina portaobjeto
4. Goteros

Reactivos:

1. Agua destilada

2. Ácido acético al 1%
3. Alcohol etílico al 50%
4. Colorante fucsina básica 0.01%
5. Colorante fast green

Procedimiento

1. En una lámina portaobjeto colocar una gota de agua destilada.
2. Se coloca un pedazo de hoja de caña de azúcar de aproximadamente 0.5 por 0.5 cm. y se introduce en un pedazo de zanahoria, esta sirve de soporte para poder hacer cortes muy finos de hoja.
3. Se le añade 1 gota de lejía a la lámina con la muestra y dejar 2 a 3 minutos para que actúe.
4. Retirar la lejía al 5% (lejía comercial) de la muestra y lavar con agua.
5. Se añaden 2 a 3 gotas de ácido acético 0.1%.
6. Secar la muestra y luego agregar 2 gotas de alcohol etílico al 50% para terminar de lavar la muestra.
7. Añadir 3 gotas de fucsina básica 0.01% por 2 minutos.
8. Después adicionar 2 gotas de colorante fast Green durante 2 minutos más.
9. Lavar la muestra con etanol al 50% y agua hasta eliminar el exceso de colorante.
10. Realizar el montaje en glicerina.
11. Medir en el microscopio binocular.

3.2.3.2. Análisis físicos de las hojas de caña de azúcar

Se analizó el dimensionamiento de la fibra de las hojas de caña de azúcar y se hallaron los coeficientes de calidad, además se halló la densidad básica.

3.2.3.2.1. Coeficiente de flexibilidad

Cálculos

Para determinar el coeficiente de flexibilidad, seguir la ecuación:

$$C.F. = \frac{l}{D}$$

Donde:

D: Diámetro de la fibra

l: Diámetro del lumen

3.2.3.2.2. Coeficiente de rigidez

Cálculos

Para determinar el coeficiente de rigidez, seguir la ecuación:

$$C.R. = \frac{2w}{D}$$

Donde

D: Diámetro de la fibra

2w: Grosor de la pared de la fibra

3.2.3.2.3. Relación de Runkel

Cálculos

Para determinar la relación de Runkel, seguir la ecuación:

$$R.R. = \frac{2w}{l}$$

Donde

l: Diámetro del lumen

2w: Grosor de la pared de la fibra

3.2.3.2.4. Coeficiente de Peteri

Cálculos

Para determinar el coeficiente de Peteri, seguir la ecuación:

$$C.P. = \frac{L}{D}$$

Donde

D: Diámetro de la fibra

L: Longitud de la fibra

3.2.3.2.5. Densidad básica⁸⁰

Es la definición más usada y representa el peso seco de la sustancia madera encerrada en un volumen invariante, como es el volumen existente cuando las paredes celulares están saturadas de agua (volumen verde).

Procedimiento

1. Remojo: A menos que las hojas sean verdes, sumergirlas en agua a $23 \pm 2^\circ \text{C}$ durante un mínimo de 1 hora.
2. Se coloca sobre una balanza un recipiente de vidrio con agua suficiente para poder sumergir totalmente la muestra y tarar la balanza.
3. Apoyada con una aguja se sumerge la muestra, teniendo cuidado que no toque el fondo ni las paredes del recipiente, anotándose el peso indicado en la balanza.

Nota: Se trata de medir el volumen de las hojas en función del peso del líquido desplazado por su inmersión, o sea por la medición del empuje. Al sumergir la pieza en un recipiente con agua, se produce el desplazamiento de su nivel, lo que da lugar a una variación del volumen equivalente al volumen de la pieza sumergida.

4. Seque la muestra en un horno a $105 \pm 3^\circ \text{C}$ hasta peso constante. Registre ese peso como el peso seco en seco (o libre de humedad) en gramos.

Cálculos

$$D_b = \frac{A}{B}$$

Donde:

A: Peso seco de la muestra (g)

B: Volumen verde de la muestra (cm³)

Db: Densidad básica (g/cm³)

3.2.3.3. Análisis químicos de la pulpa de celulosa

3.2.3.3.1. Determinación de celulosa⁷⁶

La determinación de celulosa para la pulpa se realizó de igual forma que para las hojas de caña de azúcar, por el método del Permanganato

3.2.3.3.2. Determinación de lignina⁷⁶

La determinación de lignina para la pulpa se realizó de igual forma que para las hojas de caña de azúcar, por el método del Permanganato.

3.2.3.3.3. Rendimiento

El rendimiento es un término generalmente usado en cualquier fase del proceso de fabricación de papel como en el pulpeado, blanqueamiento, etc., indicando la cantidad de material recuperado después de cierto proceso comparándolo con la cantidad inicial del material antes que ingrese al proceso. Para que tenga significado, ambas muestras deben ser comparadas secadas al horno. En la operación de pulpeado el rendimiento

es la masa de la pulpa seca expresada en porcentaje de la masa de madera seca⁸¹.

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{W_p}{W_m} \times 100$$

Donde:

W_p = Peso seco de pulpa, g.

W_m = Peso seco de materia prima, g.

Como ya se mencionó, la obtención de pasta de celulosa se basa en la separación de las fibras naturales (compuestas básicamente de celulosa) por medios mecánicos (mediante la acción de molinos y/o refinadores) y/o químicos (disolviendo la lignina que mantiene unidas las fibras). En la tabla 11 se resumen los principales procesos de fabricación de pasta existentes²³.

Tabla 11*Clasificación de los procesos de producción de pulpa de madera según sus rendimientos^a*

Forma de madera	Nombre común	Tratamiento químico	Tratamiento mecánico	Rendimiento en pulpa (%)
Mecánico				
Tarugos	Madera molida, fría y caliente ^b	Ninguno	Piedra de molino	93-98
Astillas	Refinador mecánico (RMP)	Ninguno	Refinador de disco	93-98
Astillas	Masonite	Vapor	Expansión de vapor	80-90
Astillas	Asplund (fibra burda)	Vapor	Refinador de disco	80-90
Astillas	Termomecánica (TMP)	Vapor	Refinador de disco (presión)	91-65
Quimicomecánico y quimicothermomecánico				
Tarugos	Madera molida vaporizada	Vapor	Piedra de moler	80-90
Tarugos	Madera molida, proceso Decker	Sulfito ácido (Ca, Na, Mg)	Piedra de moler	80-90
Tarugos	Madera molida, proceso Fish	Kraft	Piedra de moler	85-90
Tarugos	Madera molida químicamente	Sulfito neutro	Piedra de moler	80-90
Astillas	Sosa fría	Sosa cáustica	Refinador de disco	80-90
Astillas	Sulfito alcalino	Sulfito alcalino	Refinador de disco	80-90
Astillas	Quimicothermomecánica	Vapor + productos químicos	Refinador de disco (presión)	65-85
Semiquímica				
Astillas	Sulfito neutro (NSSC)	$\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{Na}_2\text{CO}_3, \text{NaHCO}_3$	Refinador de disco	65-90
Astillas	Kraft	$\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{S}$	Refinador de disco	75-85
Astillas	Licor verde	$\text{Na}_2\text{S} + \text{Na}_2\text{CO}_3$	Refinador de disco	65-85
Astillas	Sosa	Hidróxido de sodio	Refinador de disco	65-85
Astillas	Sin azufre	$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaOH}$	Refinador de disco	65-85

Continuación de Tabla 11

Químico de alto rendimiento				
Astillas	Kraft (sulfato)	NaOH + Na ₂ S	Refinador de disco	55-65
Astillas	Sulfito	Sulfito ácido (Ca, Na, Mg)	Refinador de disco	55-70
Astillas	Sulfito	Bisulfito (Na, Mg)	Refinador de disco	55-70
Totalmente químico				
Astillas	Kraft (sulfato)	Na ₂ S + NaOH	Suave o ninguno	40-55
Astillas	Polisulfuro (una etapa)	(NaOH + Na ₂ S) _x	Suave o ninguno	45-60
Astillas	Polisulfuro (dos etapas)	Pre tratamiento H ₂ S; kraft	Suave o ninguno	45-60
Astillas	Sosa	Sosa cáustica	Suave o ninguno	40-55
Astillas	Sosa-AQ	NaOH + antraquinona	Suave o ninguno	45-55
Astillas	Sosa-oxígeno, dos etapas	NaOH; oxígeno	Refinador de disco	45-60
Astillas	Sulfito ácido	Sulfito ácido (Ca, Na, Mg, NH ₃)	Suave o ninguno	45-55
Astillas	Bisulfito	Bisulfito (Na, Mg, NH ₃)	Suave o ninguno	45-60
Astillas	Magnefita	Bisulfito de magnesio	Suave o ninguno	45-60
Astillas	Sulfito neutro	Sulfito neutro	-	45-55
Astillas	Sulfito, multietapas			
	Stora	Sulfito-bisulfito; SO ₂	Ninguno	45-55
	Sivola	Sulfito; sulfito alcalino	Ninguno	45-55
Pulpa para disolver				
Astillas	Pre hidrólisis kraft	Pre hidrólisis kraft	Ninguno	35
Astillas	Sulfito	Sulfito ácido (Ca, Na)	Ninguno	35

^a Pulpa sin humedad y base de la madera.

^b Temperatura alta y baja en el poso del molino

Nota. Recuperado de "Pulpa y papel. Vol. 1". Casey, J. 1990.

IV. RESULTADOS

4.1. Composición química de las hojas de caña de azúcar

4.1.1. Determinación de humedad

La tabla 12 representa el porcentaje de humedad presente en las muestras antes de ser tratadas.

Tabla 12

Porcentaje de humedad (%) en hojas de caña de azúcar

Tratamiento	Humedad (%)
1	38.8
2	41.1
3	40.5
Promedio	40.1

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

4.1.2. Determinación de extraíbles solubles en agua

La tabla 13 representa el porcentaje de extraíbles solubles presentes en las muestras antes de ser tratadas.

Tabla 13

Porcentaje de extraíbles solubles en agua (%) en las hojas de caña de azúcar

Tratamiento	Extraíbles (%)
1	16
2	18
3	17.5
Promedio	17.2

Nota. Elaborada por los autores. 2017

4.1.3. Determinación de extraíbles orgánicos

La tabla 14 representa el porcentaje de extraíbles orgánicos presentes en las muestras antes de ser tratadas.

Tabla 14*Porcentaje de extraíbles orgánicos (%) en las hojas de caña de azúcar*

Tratamiento	Extraíbles (%)
1	3.72
2	4.96
3	4.55
Promedio	4.41

Nota. Elaborada por los autores. 2017.**4.1.4. Determinación de lignina**

La tabla 15 representa el porcentaje de lignina presente en las muestras antes de ser tratadas.

Tabla 15*Porcentaje de lignina (%) en hojas de caña de azúcar*

Tratamiento	Lignina (%)
1	17.75
2	21.52
3	23.89
Promedio	21.05

Nota. Elaborada por los autores. 2017**4.1.5. Determinación de celulosa**

La tabla 16 representa el porcentaje de celulosa presente en las muestras antes de ser tratadas.

Tabla 16*Porcentaje de celulosa (%) en hojas de caña de azúcar*

Tratamiento	Celulosa (%)
1	35.85
2	35.94
3	34.60
Promedio	35.47

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

4.1.6. Determinación de hemicelulosa

Tabla 17

Porcentaje de hemicelulosa (%) en hojas de caña de azúcar

Tratamiento	Lignina	Celulosa	Total	Hemicelulosa
1	26.88	61.91	88.81	11.21

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

4.1.7. Determinación de cenizas

La tabla 18 representa el porcentaje de cenizas presente en las muestras antes de ser tratadas.

Tabla 18

Porcentaje de cenizas (%) en hojas de caña de azúcar

Tratamiento	Cenizas (%)
1	8
2	5
3	9
Promedio	7.3

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

La composición química de las hojas de caña de azúcar se muestra en la tabla 19 (Anexo 4).

Tabla 19

Composición química (%) de las hojas de caña de azúcar

Componentes Químicos	Porcentaje (%)
Extraíbles en Agua	17.25
Extraíbles Orgánicos	4.41
Lignina	21.05
Celulosa	35.47
Hemicelulosa	11.21
Cenizas	7.3
Otros	3.27
Total	100

Nota. Hecho por los autores. 2017.

4.2. Pulpaje en sus diferentes combinaciones

Tabla 20

Combinación de tiempo de cocción, concentración de Na(OH) y tamaño de partícula experimentados para la obtención de pulpa a partir de hojas de caña de azúcar

Trat.	VARIABLES			ENSAYOS			
	Tiempo (h)	Conc. Na(OH) (%p/v)	Tamaño Partícula (cm)	E 1 (g)	E 2 (g)	E 3 (g)	Prom. (g)
1	1	5	0.1	0.91	1.07	1.68	1.22
2	1.5	5	0.1	0.68	1.08	1.24	1
3	2	5	0.1	0.88	1.35	1.21	1.15
4	1	10	0.1	0.74	0.87	1.35	0.99
5	1.5	10	0.1	0.58	0.97	0.96	0.84
6	2	10	0.1	0.62	0.94	0.94	0.83
7	1	15	0.1	0.59	0.91	1.28	0.93
8	1.5	15	0.1	0.55	0.81	1.13	0.83
9	2	15	0.1	0.64	0.62	0.82	0.69
10	1	5	0.5	0.93	1.28	1.46	1.22
11	1.5	5	0.5	0.94	1.23	1.16	1.11
12	2	5	0.5	0.92	1.18	1.11	1.07
13	1	10	0.5	0.78	0.98	1.27	1.01
14	1.5	10	0.5	0.7	1.01	1.07	0.92
15	2	10	0.5	0.62	0.88	0.95	0.82
16	1	15	0.5	0.61	1.06	1.04	0.9
17	1.5	15	0.5	0.77	0.92	0.93	0.87
18	2	15	0.5	0.62	0.9	0.82	0.78
19	1	5	2	1.38	1.27	1.48	1.38
20	1.5	5	2	1	1.21	1.29	1.16
21	2	5	2	0.79	1.29	1.15	1.08
22	1	10	2	1.17	1.11	1.26	1.18
23	1.5	10	2	0.88	0.74	1.14	0.92
24	2	10	2	0.66	1.08	0.96	0.9
25	1	15	2	1.08	1.14	1.28	1.17
26	1.5	15	2	0.71	0.96	1.05	0.91
27	2	15	2	0.75	0.98	0.9	0.88

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

4.3. Control de calidad

4.3.1. En hojas de caña de azúcar

Conocer las dimensiones de la fibra de las hojas de caña de azúcar fue de mucha importancia, ya que predijeron la calidad que puede tener la pulpa, con estos valores se hallaron coeficientes importantes para determinar índices de control de calidad. La tabla 21 muestra la densidad de las hojas de caña de azúcar, dicho análisis predice el comportamiento del rendimiento y de algunas propiedades físicas de la pulpa.

Tabla 21

Densidad (g/cm³) de las hojas de caña de azúcar

Experimento	ρ (g/cm ³)
1	0.288
2	0.288
3	0.287
Promedio	0.287

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

La tabla 22 muestra el dimensionamiento de la fibra de hojas de caña de azúcar, como son largo de la fibra, diámetro de la fibra, diámetro del lumen y grosor de la pared de la fibra, los mismos que fueron determinados en microscopio electrónico

Tabla 22

Dimensionamiento de la fibra (μm) de las hojas de caña de azúcar

Experimento	L (μm)	D (μm)	l (μm)	w (μm)
1	20000	12.28	8.21	1.98
2	5000	12.28	7.26	2.45
3	1000	12.23	8.05	2.07
Promedio	8666.67	12.26	7.84	2.16
Promedio Corregido	7800	11.03	8.71	1.19

p: densidad, L: Largo de fibra, D: Diámetro de fibra, l: Diámetro del lumen, w: Grosor de la pared de la fibra/2.

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

A partir del dimensionamiento de la fibra de hojas de caña de azúcar se obtuvieron coeficientes que predijeron la calidad de pulpa obtenida. En la tabla 23 se pueden observar el coeficiente de flexibilidad, coeficiente de rigidez, coeficiente de Peteri y relación de Runkel (Calculados en Anexo H).

Tabla 23

Coeficientes de flexibilidad, rigidez y Peteri, y relación de Runkel hallados a partir del dimensionamiento de las fibras de hojas de caña de azúcar

	Resultados
Coeficiente de Flexibilidad	0.79
Coeficiente de Rigidez	0.22
Coeficiente de Peteri	707.17
Relación de Runkel	0.27

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

4.3.2. En pulpa de celulosa

4.3.2.1. Determinación de celulosa

La tabla 24 representa el porcentaje de celulosa presente en las muestras de pulpa después de ser tratadas.

Tabla 24*Porcentaje de celulosa (%) en pulpa de celulosa*

Experimento	% Celulosa
1	91.24
2	87.50
3	90.23
4	91.67
5	93.57
6	85.68
7	85.88
8	91.81
9	85.41
10	90.64
11	93.00
12	92.35
13	85.52
14	92.64
15	92.32
16	89.65
17	93.12
18	91.12
19	86.73
20	91.81
21	87.14
22	90.73
23	81.91
24	86.43
25	88.83
26	91.35
27	91.69

Nota. Elaborada por los autores. 2017.**4.3.2.2. Determinación de lignina**

La tabla 25 representa el porcentaje de lignina presente en las muestras de pulpa después de ser tratadas.

Tabla 25*Porcentaje de lignina (%) en pulpa de celulosa*

Experimento	% Lignina
1	0.47
2	4.48
3	2.70
4	1.20
5	1.18
6	6.88
7	6.96
8	2.11
9	8.37
10	1.71
11	0.48
12	0.67
13	6.51
14	0.53
15	0.30
16	2.26
17	0.61
18	1.15
19	5.03
20	0.64
21	4.85
22	1.89
23	8.84
24	5.78
25	2.08
26	2.12
27	0.66

Nota. Elaborada por los autores. 2017.**4.3.2.3. Rendimiento**

La tabla 26 representa el porcentaje de rendimiento y rendimiento corregido obtenidos de las muestras tratadas (Anexo 7).

Tabla 26*Porcentaje de rendimiento (%) y rendimiento corregido (%)*

Trat.	RENDIMIENTO	
	Rendimiento (%)	Rendimiento corregido (%)
1	24.41	30.51
2	20.02	25.02
3	22.99	28.74
4	19.71	24.64
5	16.71	20.89
6	16.69	20.86
7	18.56	23.2
8	16.62	20.77
9	13.86	17.32
10	24.43	30.54
11	22.2	27.75
12	21.39	26.74
13	20.13	25.16
14	18.5	23.12
15	16.38	20.48
16	18.07	22.59
17	17.43	21.79
18	15.65	19.57
19	27.58	34.47
20	23.28	29.09
21	21.55	26.93
22	23.6	29.5
23	18.41	23.02
24	18.03	22.54
25	23.39	29.23
26	18.14	22.67
27	17.53	21.91

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

4.3.3. Resultados de optimización

Los resultados obtenidos en cada ensayo con la combinación de las variables de su respectivo experimento se trasladaron al programa estadístico STATGRAPHICS Centurion XVI.I, en donde se creó un diseño de clase superficie de respuesta con diseño factorial completo 3^3 . Al analizar el rendimiento con este diseño nos brindó el siguiente análisis de varianza.

Tabla 27

Análisis de varianza para el rendimiento

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:T	121.7260	1	121.7260	91.710	0.0000
B:Cc	183.9740	1	183.9740	138.610	0.0000
C:Tp	41.7393	1	41.7393	31.450	0.0000
AA	13.1918	1	13.1918	9.940	0.0058
AB	0.8060	1	0.8060	0.610	0.4465
AC	11.4663	1	11.4663	8.640	0.0092
BB	27.3351	1	27.3351	20.590	0.0003
BC	3.4482	1	3.4482	2.600	0.1254
CC	2.53E-05	1	2.5268E-05	0.000	0.9966
Error total	22.5639	17	1.32729		
Total (corr.)	441.408	26			

Nota. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

La tabla 27 muestra la significancia estadística, expresada por el valor-P, de los diferentes efectos que pueden presentarse en este tipo de diseño, los cuales son las variables independientes por separado, cada interacción entre las variables y el cuadrado de cada variable. . En este caso, 6 efectos tienen un valor-P menor a 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza de 95%, lo que significa que

tan solo ellos pueden ser tomados en cuenta para elaborar el modelo correcto.

Estos 6 valores pueden apreciarse mejor en el diagrama de Pareto estandarizado, el cual brinda una gráfica de barras en donde se discriminan aquellos efectos que no son estadísticamente significativos, como se muestra a continuación.

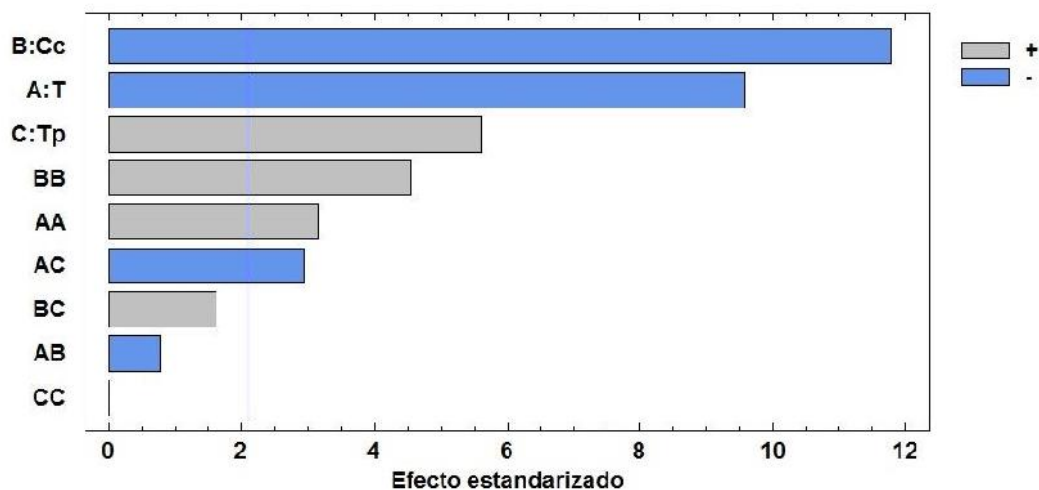


Figura 9. Diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

La figura 9 muestra gráficamente los efectos estimados en orden decreciente de importancia, la longitud de cada barra es proporcional al efecto estandarizado, el mismo que resulta de la división del efecto estimado entre su error estándar, estos valores son tomados de la tabla 28. Cualquier barra que se extienda más allá de la línea vertical (ubicada en 2.110) corresponde a efectos que son estadísticamente significativos con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 28*Efectos estimados para rendimiento*

Efecto	Estimado	Error Estándar
Promedio	22.6646	0.7778
A:T	-5.3301	0.5566
B:Cc	-6.5527	0.5566
C:Tp	3.0456	0.5431
AA	2.9656	0.9407
AB	-0.5183	0.6652
AC	-1.8542	0.6308
BB	4.2689	0.9407
BC	1.0168	0.6308
CC	-0.0065	1.4919

Nota. Errores estándar basados en el error total con 17 grados de libertad. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

Teniendo en cuenta estos análisis, se decidió excluir aquellos efectos que no son estadísticamente significativos para poder obtener una ecuación con mayor precisión en los datos y así obtener una respuesta más exacta a la realidad. El análisis de varianza que mostró el programa luego de excluir los datos se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 29*Análisis de varianza corregido para rendimiento*

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:T	121.726	1	121.726	90.78	0.00000
B:Cc	204.964	1	204.964	152.85	0.00000
C:Tp	46.3798	1	46.3798	34.59	0.00000
AA	13.1918	1	13.1918	9.84	0.00520
AC	11.4663	1	11.4663	8.55	0.00840
BB	27.3351	1	27.3351	20.39	0.00020
Error total	26.8182	20	1.34091		
Total (corr.)	441.408	26			

Nota. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

La tabla 29 muestra que todos los efectos son estadísticamente significativos debido a que tienen el valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%, de esta forma se obtienen valores con mayor exactitud.

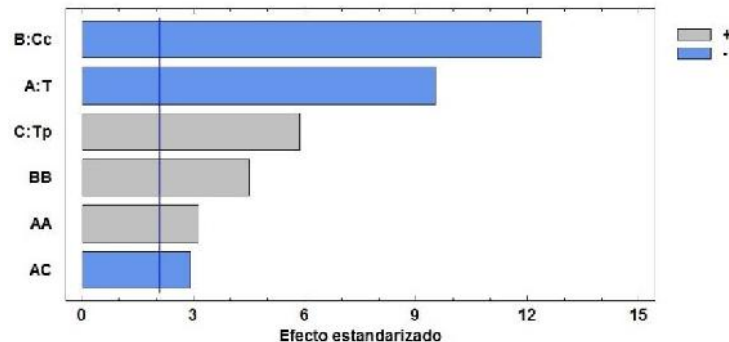


Figura 10. Corrección del diagrama de Pareto estandarizada para rendimiento. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

En la figura 10 se aprecia que todos los efectos deben ser tomados en cuenta por el modelo estadístico debido a que la longitud de sus barras correspondientes, que son valores calculados a partir de tabla 30, sobrepasan la línea vertical (ubicada en 2.086) y cualquiera que se extienda más allá de ella, corresponde a efectos que son estadísticamente significativos con un 95.0% de nivel de confianza.

Tabla 30

Efectos estimados corregidos para el rendimiento

Efecto	Estimado	Error Estándar
promedio	22.6619	0.5008
A:T	-5.3301	0.5594
B:Cc	-6.7489	0.5459
C:Tp	3.0448	0.5177
AA	2.9656	0.9455
AC	-1.8542	0.6341
BB	4.2689	0.9455

Nota. Errores estándar basados en el error total con 20 grados de libertad. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017

Basados en los análisis corregidos, se decidió hallar los coeficientes de regresión para el rendimiento y así construir la ecuación de regresión. El programa arrojó los siguientes resultados.

Tabla 31

Coeficientes de regresión para rendimiento

Coeficiente	Estimado
constante	54.5320
A:T	-21.0740
B:Cc	-2.3824
C:Tp	4.5302
AA	5.9311
AC	-1.9518
BB	0.0854

Nota. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

La ecuación de regresión relaciona las variables independientes que son el tiempo de cocción, concentración de soda cáustica y tamaño de partícula en función del rendimiento, que es la variable dependiente. Esta ecuación determina el rendimiento para cualquier valor que puedan tomar las variables independientes. La ecuación se muestra a continuación:

$$\text{Rendimiento} = 54.4320 - 21.0740 * T - 2.3824 * Cc + 4.5302 * Tp + 5.9311 * T^2 - 1.9518 * T * Tp + 0.0854 * Cc^2$$

Donde los valores de las variables están especificadas en sus unidades originales. Conociendo esta ecuación, el programa nos brindó una respuesta óptima, cuyo objetivo es maximizar el rendimiento del proceso que tenemos. El programa arrojó un valor de 34.76%, que es cercano al mayor valor de rendimiento de la base de datos, en la tabla 32 se muestra

la combinación de los niveles de los factores que encuentran el valor antes mencionado.

Tabla 32

Valores óptimos de las variables independientes

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
T	1.0	2.0	1.0
Cc	5.0	15.0	5.0
Tp	0.1	2.0	2.0

Nota. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

Se realizaron gráficos en donde se observa el comportamiento del rendimiento cuando una variable es constante, éstos fueron de gran ayuda para entender el comportamiento de cada variable y así darnos cuenta de las decisiones que se puedan tomar.

Superficie de respuesta a tamaño de partícula constante.

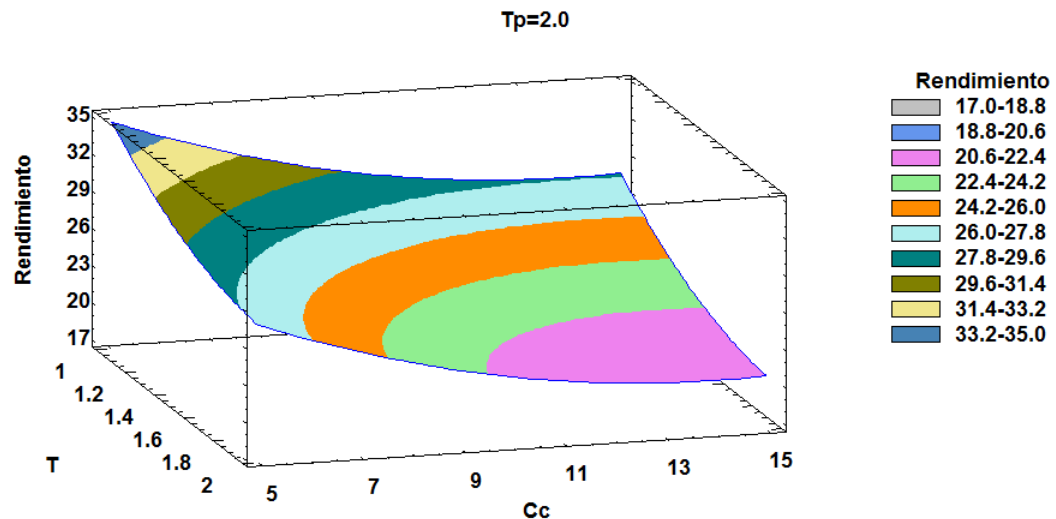


Figura 11. Superficie de respuesta estimada para rendimiento (Tp=cte). Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

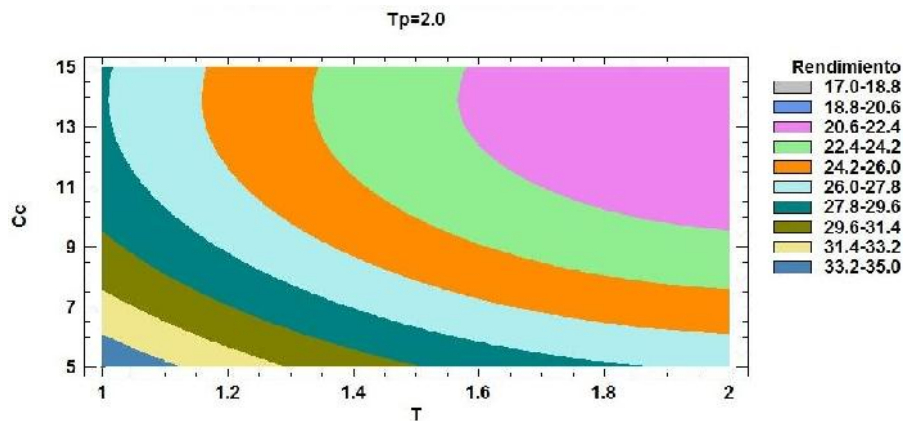


Figura 12. Contornos de la superficie de respuesta estimada ($T_p = \text{cte}$). Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

La figura 11 y figura 12 muestran graficas de la estimación de rendimiento en función del tiempo de cocción y concentración de soda cáustica en 3D y 2D respectivamente, en donde podemos observar que mientras la concentración de soda cáustica y el tiempo disminuyen, el rendimiento se eleva. Los mejores resultados en este caso se obtuvieron con un tiempo de 1 hora y concentración de soda cáustica de 5%.

Superficie de respuesta a tiempo de cocción constante.

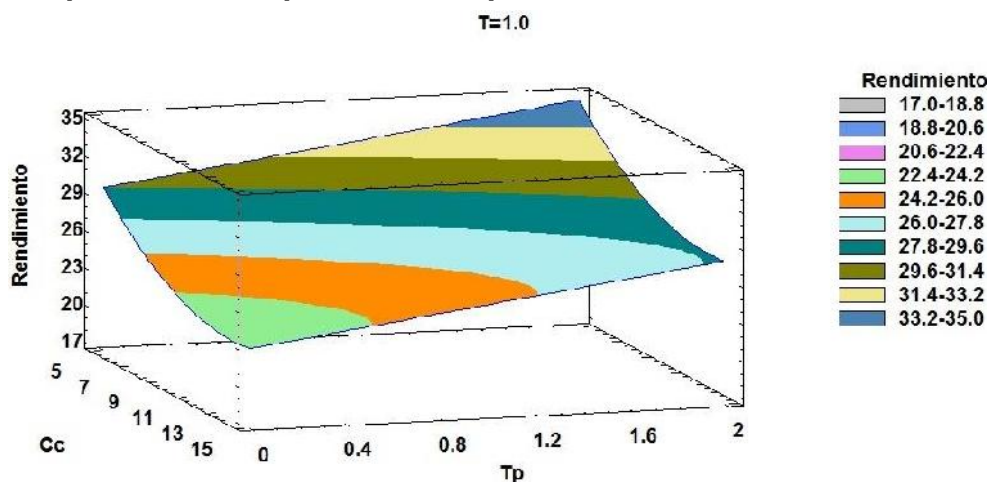


Figura 13. Superficie de respuesta estimada para rendimiento ($T = \text{cte.}$). Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

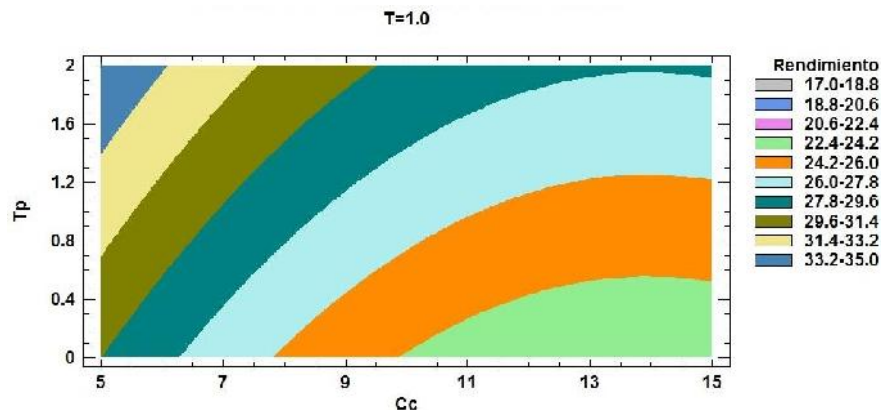


Figura 14. Contornos de la superficie de respuesta estimada ($T=cte.$). Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017

La figura 12 y figura 13 muestran graficas de la estimación de rendimiento en función del tamaño de partícula y concentración de soda cáustica en 3D y 2D respectivamente, en donde podemos observar que mientras el tamaño de partícula aumenta y la concentración de soda cáustica disminuye, el rendimiento es mucho mejor, es por eso que el rango de concentración de soda cáustica de 5 a 6% y el tamaño de partícula de 1.5 a 2 cm son los ideales para obtener un alto rendimiento que se encuentra en 33.2 y 35%.

Superficie de respuesta a concentración constante

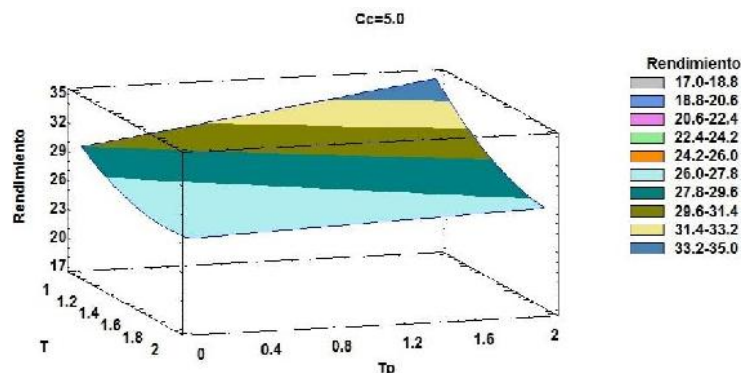


Figura 15. Superficie de respuesta estimada para rendimiento ($Cc=cte.$). Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

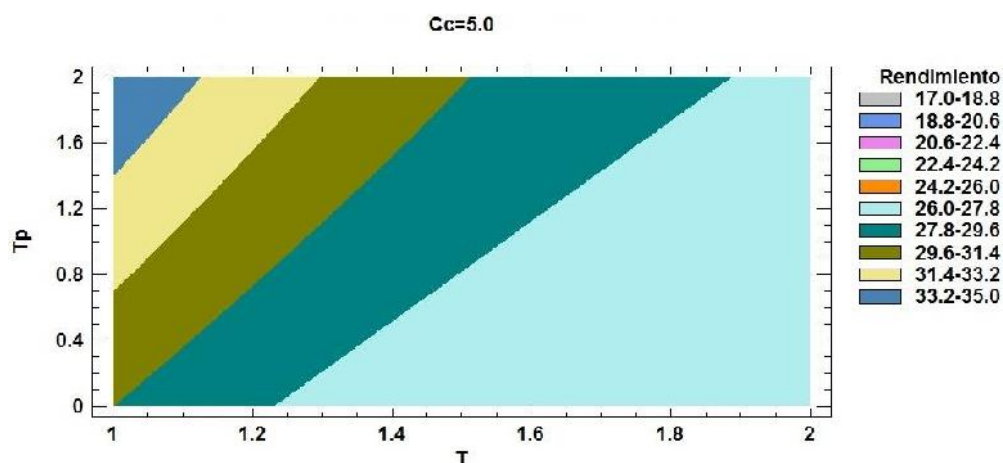


Figura 16. Contornos de la superficie de respuesta estimada ($C_c = \text{cte.}$). Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017

La figura 15 y la figura 16 muestran graficas de la estimación de rendimiento en función del tiempo de cocción y tamaño de partícula en 3D y 2D respectivamente, en donde podemos observar que mientras el tamaño de partícula aumenta y el tiempo disminuye, el rendimiento es mejor; es por ello que el rendimiento máximo se encuentra con los valores cercanos a 2 para el tamaño de partícula y cercanos a 1 para el tiempo, el mismo que oscila entre los valores de 33.2 y 35%.

El comportamiento que tuvo cada variable independiente de forma individual se muestra en la figura 17, según se observó el tiempo de cocción y la concentración de soda cáustica tienen el mismo comportamiento pero el tamaño de partícula tiene un comportamiento opuesto, se entiende por esto que mientras los valores de las primeras variables mencionadas disminuyen y el de la última aumenta, el rendimiento baja y sube respectivamente. También se pudo observar que las pendientes de concentración de soda cáustica y tiempo de cocción tienen una incidencia

significativa para la obtención de pulpa y la de tamaño de partícula es la que tiene menos incidencia para alcanzar el rendimiento más alto.

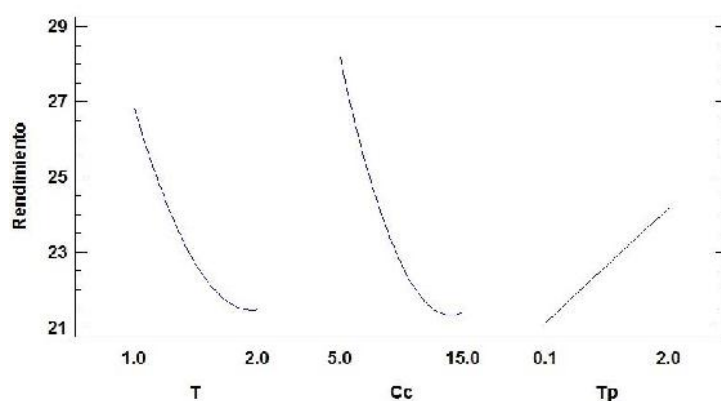


Figura 17. Efectos principales de las variables para el rendimiento. Recuperado del programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I. 2017.

Los resultados obtenidos para el control de calidad se muestran en la tabla 33, se determinaron los coeficientes de calidad en hojas de caña de azúcar que se obtuvieron con el dimensionamiento de la fibra y los porcentajes de celulosa y lignina que se alcanzaron con los parámetros óptimos del proceso de obtención de pulpa.

Tabla 33

Resultados del control de calidad en hojas y pulpa

Coeficientes de calidad en hojas de caña de azúcar	Valor
Coeficiente de Flexibilidad	0.79
Coeficiente de Rigidez	0.22
Coeficiente de Runkel	0.27
Coeficiente de Peteri	707.17
Densidad (g/cm³)	0.287
Composición química de pulpa	Porcentaje (%)
Rendimiento	34.47
Celulosa	86.73
Lignina	5.03

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

Los coeficientes de calidad de las hojas de caña de azúcar reflejaron que la pulpa que se obtendría de ellas sería de muy buena calidad, ya que presenta un valor alto en el coeficiente de Flexibilidad, y valores bajos en los coeficientes de rigidez y la relación de Runkel, pero en el coeficiente de Peteri se halló un valor alto debido a que las fibras de las hojas de caña de azúcar tienen la misma longitud que la hoja; estos valores calculados muestran entonces que las hojas de caña de azúcar pueden brindar pulpas con resistencia a la tensión, al rasgado y al doblez; las fibras de esta pulpa se colapsan con facilidad y por último se considera que presenta una buena flexibilidad.

También se observa en la tabla que el valor de densidad está cercano a los rangos que se encuentran en bibliografía; de esta manera podemos comprobar lo que predicen los datos hallados anteriormente.

Asimismo los valores de la composición química son muy próximos a los de la bibliografía, teniendo así que las hojas de caña de azúcar cumplen los requisitos para ser una buena opción como materia prima en la obtención de pulpa de celulosa a partir de las hojas de caña de azúcar.

V. DISCUSIÓN

Este trabajo de investigación busca determinar la mejor combinación de tres variables (concentración de soda cáustica, tiempo de cocción y tamaño de partícula) y a su vez optimizarlas, ya que son importantes para la obtención de pulpa de celulosa.

Las hojas de caña de azúcar, fuente única y primordial de materia prima de este proceso, se sometieron a análisis, dando como resultado que el porcentaje de celulosa fue de 35.47%, muy por encima de muchos de los materiales lignocelulósicos no madereros (Tabla 3), pero por debajo de los rangos de los diferentes tipos de madera (Tabla 11); también se obtuvo como resultado el porcentaje de lignina que fue de 21.05%, por encima de los materiales lignocelulósicos no leñosos y por debajo de la madera; con estos valores nos pudimos dar cuenta que las hojas de caña de azúcar están aptas para producir pulpa de celulosa.

Para definir los parámetros de las variables a estudiar se recurrió a la bibliografía indicada, tomando como referencia los estudios realizados para otros materiales lignocelulósicos no madereros, ya que para las hojas de caña de azúcar no se encontró un proceso ya realizado.

Los parámetros fijos (temperatura, cantidad de muestra (g) y volumen de solución de Na(OH) se tomaron también de referencia bibliográfica, pero en ella existían rangos, los cuales se definieron por medio de experimentación previa, con muestras representativas se decidió que la

temperatura ideal sería de 150°C, ya que a menos grados no reaccionaba la soda y a más grados se perdía el rendimiento; así también el volumen de solución de Na(OH) fue de 1:10 con respecto a los gramos de la muestra, debido a que si la proporción era menor, la solución no la cubría por completo y esta no reaccionaba en su totalidad, de la misma manera la cantidad de muestra fue de 5 gramos, debido a que la referencia bibliográfica nos brindó un máximo valor de 55% de rendimiento (Tabla 11), y esto generada que la cantidad de pulpa obtenida era la indicada para los análisis de control de calidad.

El proceso de pulpeo tomado para esta investigación fue un proceso alcalino, que fue definido por el nivel de contaminación que producía, por ello se decidió tomar el proceso a la sosa, ya que es uno de los menos contaminantes, además de que el Na(OH) es un buen reactivo deslignificante.

Para el pulpaje se necesitaba un biodigestor pero la Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo” no contaba con tal equipo, debido a esto se tuvo que adaptar otra forma de realizar la cocción, se usaron frascos de vidrio herméticos con tapa rosca, los cuales fueron previamente esterilizados, para después añadir la muestra y llevarla a la estufa controlando 2 tiempos, el primero denominado tiempo de elevación (100-150°C) que debía ser lento para garantizar una penetración completa del material y que se logre una mayor eliminación de lignina⁸², este tiene una durabilidad de 45 minutos, y el

segundo denominado tiempo a temperatura máxima de cocción (150°C), que es constante hasta culminar con el tiempo establecido para el pulpaje.

Al sacar las muestras de la estufa, se procedió a lavarlas con agua destilada por medio de un colador, para así remover la solución de soda cáustica y los componentes que no son de utilidad para este proceso, se observó que se perdía muestra, debido a ello se consideró un 20% de porcentaje de error, luego se procedió a secar las muestras para poder realizar el control de calidad de las mismas.

Dentro de los diferentes experimentos que se realizaron, se halló el mejor rendimiento que fue de 34.47%, teniendo como combinación de variables el siguiente arreglo: 5% de concentración de $\text{Na}(\text{OH})$, 2 cm. de tamaño de partícula y 1 hora de tiempo de cocción; este resultado con respecto a lo encontrado en la literatura es muy cercano al rendimiento que se obtiene de la paja de arroz (Tabla 3) (40-43%), así como al encontrado de la madera (Tabla 11) (40-55%), y demuestra que las hojas de caña de azúcar son una buena opción como materia prima para obtener pulpa de celulosa.

Los resultados obtenidos se analizaron mediante el programa STATGRAPHICS CENTURION XVI.I., usando un diseño de superficie de respuesta denominado Diseño Factorial 3^3 , el cual se basa en la optimización de las variables estudiadas y la influencia de las mismas en este estudio, generando gráficos y tablas que permiten evaluar el rendimiento óptimo. Cuando los datos ingresados en el programa se corrieron, el cuadro de Análisis de Varianza (ANOVA) mostró que habían 3

valores que eran no significativos, esto significa que dichos valores tienen que ser excluidos para elaborar el modelo estadístico correcto, debido a que afectan en el valor del rendimiento, alejándolo del objetivo deseado, que es la optimización; por ello se decidió reajustar el modelo estadístico. El programa reafirmó que el mayor rendimiento se encontraba con la misma combinación de variables que mostró la experimentación, pero debido a que la ecuación del modelo es ajustado la respuesta óptima fue 34.7%, sin embargo este valor no difiere mucho del hallado en la experimentación, por ello el modelo estadístico es el adecuado para este proceso.

El programa permite evaluar el rendimiento en función de dos factores manteniendo un tercero constante; así como también el comportamiento de los mismos individualmente.

En la gráfica del rendimiento en función del tiempo de cocción y la concentración de soda cáustica, manteniendo constante el tamaño óptimo de partícula se observó que mientras los valores de las dos variables disminuían, el rendimiento era mayor; además que para el valor constante del tamaño de partícula de 2 cm. los rendimientos variaban de 20.6 – 35.0%.

También se analizó la gráfica del rendimiento en función de la concentración de soda cáustica y el tamaño de partícula, manteniendo el tiempo constante, el análisis mostró que a medida que los valores de la primera variable eran menores y de la segunda mayores, el rendimiento

llegaba a rangos más altos; adicional a ello, al mantener el tiempo de cocción constante, el rendimiento oscilaba entre 22.4 - 35.0%.

Asimismo al interpretar la gráfica del rendimiento en función del tiempo de cocción y tamaño de partícula, manteniendo la concentración de soda cáustica constante, ésta señaló que si el tiempo de cocción disminuye y el tamaño de partícula aumenta, el rendimiento alcanza su mayor valor; y también manteniendo constante la concentración de soda cáustica los valores del rendimiento varían de 26% a 35%.

Se analizó la pulpa de celulosa obtenida a partir de los parámetros óptimos sometiéndola a análisis físicos y químicos para comprobar su calidad; si bien no se realizaron análisis con profundidad debido a que no se contaba con los insumos y equipos necesarios, se hicieron los fundamentales como lo son: el dimensionamiento de las fibras de las hojas de caña de azúcar, que sirvieron para predecir la calidad de pulpa, los cuales fueron diámetro de fibra, diámetro de lumen, grosor de la pared celular y largo de fibra, con los que se obtuvieron los coeficientes de rigidez, flexibilidad, Peteri y la relación de Runkel, también se analizó la densidad de las hojas de caña de azúcar, este análisis y los anteriores nos permiten conocer qué tendencias tiene la pulpa, tanto positiva como negativa, en su resistencia al rasgado, resistencia a la tensión, contacto fibra a fibra, flexibilidad de la fibra y resistencias mecánicas respectivamente; así también se hicieron análisis para determinar el porcentaje de lignina, celulosa y hemicelulosa.

Los análisis físicos mostraron valores de 0.79, 0.22, 707.17 y 0.27 (Anexo 6) con relación a los coeficientes de flexibilidad, rigidez, Peteri y relación de Runkel respectivamente, al ser comparados con lo encontrado en la bibliografía^{56 57 58 59} con lo cual se predijo que la pulpa obtenida presentaría alta resistencia a la tensión, al rasgado y doblez; hay un mayor colapso entre las fibras y que mayor sería la posibilidad de producir una pulpa de muy buena calidad; asimismo se encontró un valor muy alto en el coeficiente de Peteri debido a que la longitud de las fibras de las hojas de caña de azúcar son del tamaño de la misma hoja, por ello no se asemeja el valor obtenido a lo encontrado en la bibliografía⁸³, entonces se necesitaría hacer el papel para comprobar estas cualidades y analizar bien la influencia del coeficiente de Peteri en la pulpa a partir de hojas de caña de azúcar.

También se halló que la densidad de las hojas de caña de azúcar fue 0.29 gr/cm³, este valor se encuentra cerca del rango de los valores hallados en materiales leñosos utilizados para hacer papel, teniendo como mínimo valor 0.34 gr/cm³ para *Guatteria Anómala*⁵⁵ y máximo de 0.544 gr/cm³ para *Eucalyptus Globulus*⁸⁴. Este resultado puede predecir que la pulpa producida tendría un buen rendimiento y mayores resistencias mecánicas, lo que se ha comprobado con el pulpaje y los análisis anteriores.

Así mismo los análisis químicos dieron como resultado que el porcentaje de lignina fue de 5.03% y el de celulosa de 86.73%, estos datos comparados con la bibliografía (Anexo 10) tiene valores muy cercanos al

de la pulpa kraft, cuando el rendimiento de la misma es de 40% (cercano al experimentado en esta investigación, 34.4%), que en el caso del Pino es de 87.5% y 6.25%, y del Abedul es de 85% y 4.38% de celulosa y lignina respectivamente en ambos casos.

Con estos resultados podemos comprobar que las hojas de caña de azúcar pueden ser una alternativa como materia prima en la producción de pulpa de celulosa, debido que cuenta con requisitos importantes que se necesitan para esta industria, muy parecidos a los de la madera.

Uno de los árboles más usados en la industria pastero-papelera es el Eucalipto, dentro de sus variedades el *Eucalyptus Saligna* tiene un volumen de 169 m³, con el cual se puede obtener 76.21 Tn. de pulpa de celulosa; esta misma cantidad puede ser obtenida de 221 Tn. de hojas de caña de azúcar, las mismas que pueden ser cosechadas en aproximadamente 18 Ha. de cultivos de caña de azúcar. En Lambayeque se cosechan alrededor de 25548.78 Ha. de cultivos de caña de azúcar por año, que podrían ser el reemplazo de 1419 árboles del tipo *Eucalyptus Saligna* (Anexo 11); con material de desecho como lo son las hojas de la caña de azúcar se evitarían muchos problemas medioambientales: la quema de las mismas, la tala de muchos árboles, la erosión de los suelos, etc. Por ello son una muy buena opción como fuente de materia prima para la Industria Pastero-Papelera.

VI. CONCLUSIONES

1. Se determinaron los parámetros más eficientes para la obtención de pulpa a partir de las hojas de caña de azúcar, los cuales tienen la siguiente combinación: Tiempo de cocción de 1 hora, tamaño de partícula de 2 cm. y concentración de soda cáustica de 5%.
2. Se obtuvo pulpa de alta calidad a partir de las hojas de caña de azúcar considerando que el control de calidad del mayor rendimiento indicó un 86.73% de celulosa y 5.03% de lignina, además los coeficientes de calidad de las hojas de caña de azúcar demostraron que es una excelente opción para la fabricación de papel.
3. Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se comprueba que las hojas de caña de azúcar son una gran alternativa para la obtención de pulpa, por ello al ser usadas para este proceso se evita la quema de las mismas y por consiguiente la contaminación que ésta conlleva.

VII. RECOMENDACIONES

1. Realizar el pulpaje de las hojas de caña de azúcar con métodos diferentes al de la soda cáustica como el proceso mecánico, kraft, etc.
2. Analizar otros parámetros (trabajar con hojas secas, temperatura, etc.) para encontrar su influencia en la obtención de pulpa de celulosa y hallar mejores rendimientos.
3. Utilizar un biodigestor para el pulpaje de las hojas de caña de azúcar, ya que es el equipo óptimo para este tipo de proceso; así se podrá obtener un mejor rendimiento.
4. Emplear como materia prima las hojas secas de la caña de azúcar, y analizar las diferencias entre ellas y las que se usaron en este trabajo de investigación (hojas verdes) con respecto a su rendimiento, propiedades físicas y químicas; así como también el uso conjunto de ambas hojas.
5. Usar tamices industriales para que no se pierda mucha cantidad de muestra al ser lavada.
6. Buscar otros compuestos químicos que sean buenos deslignificantes y además que causen mucho menos contaminación que la soda cáustica.

7. Realizar análisis más profundos de control de calidad a la pulpa de celulosa.
8. Obtener hojas de papel a partir de las hojas de caña de azúcar y realizar el control de calidad respectivo para saber con precisión qué tipo de uso tiene la pulpa formada.
9. Investigar sobre los efectos que puede tener la sílice, ya que utilizando materiales con alto contenido de sílice con métodos alcalinos pueden dañar los equipos en el proceso.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barroso, L, y Vilboa, I. (2013). Contaminación ambiental por quema de caña de azúcar: Un estudio exploratorio en la región central del estado de Veracruz. (Monografía). Recuperado de:
http://www.igs.org.mx/sites/default/files/TG2013_Vilaboa_Barroso_0.pdf
2. Castillo, A.; Milanés, N.; Rodríguez, D. A.; Aguilar, N.; Ordóñez, P. y Lozano, F. (2007). Impacto de la quema de caña de azúcar sobre el N en suelos de la región Veracruz Central, México. *Revista Cuba & Caña*, 7-12.
3. Morales, J. (2011). Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación. (Monografía). Recuperado de:
<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32477/1/moralestrujillo.pdf>
4. Contaminación de la industria papelera. Recuperado de:
<http://www.guia-urbana.com/contaminacion/contaminacion-de-la-industria-papelera.php>
5. Carrere, R y Lohmann, L. (1996). El Papel del Sur: Plantaciones Forestales en la Estrategia Papelera Internacional. *Rev. Watershed*, 2(1), 1-13. Recuperado de:
http://wrm.org.uy/es/files/2013/04/Plantaciones_para_pulpa_de_papel.pdf
6. Curso virtual, Ministerio del Ambiente (2015). Recuperado de:
<http://www.minam.gob.pe/proyecolegios/Curso/curso->

virtual/Modulos/modulo2/3Secundaria/Actividades-

Aprendizaje/EPT_1/S3/anexo3/EPT_S3_Anexo_3.pdf

7. El papel. Su impacto sobre el medio. Greenpeace México. Recuperado de:

http://archivo.estepais.com/inicio/historicos/94/14_Medio%20ambiente_El%20papel_greenpeace.pdf

8. Gonzales, H. (2003). Recursos fibrosos de plantas no madereras para la industria papelera. (Tesis doctoral). Recuperado de:

https://www.academia.edu/8052409/RECURSOS_FIBROSOS_DE_PLANTAS_NO_MADERERAS_PARA_LA_INDUSTRIA_PAPELERA

9. Pettersen, R. (1984). The chemical composition of wood, chapter 2. *American Chemical Society*, 207(1), 984.

10. Barroso, M. (2010). Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería. (Tesis de pregrado). Recuperado de:

http://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL_BARROSO_CASILLAS.pdf

11. Misra, D. (1990). *Producción y Blanqueo de Pulpa de Fibras No Leñosas. Tecnología de Pulpa y Papel, Volumen I: Pulpa*. México DF, México: Ed. LIMUSA.

12. El papel. Su impacto sobre el medio. Greenpeace México. Recuperado de:

http://archivo.estepais.com/inicio/historicos/94/14_Medio%20ambiente_El%20papel_greenpeace.pdf

13. Isenberg, I. (1967). *Materias Primas Fibrosas y Estructura de la Madera. Ciencia y Tecnología sobre Pulpa y Papel. T-1: Pulpa*. México DF, México: Ed. E. LIBBY. CECSA.
14. Ayuni, N. (2012). SYNTHESIS OF AMORPHOUS SILICA FROM SUGAR CANE LEAF BY CHEMICAL EXTRACTION METHOD. (Tesis de pregrado). Recuperado de:
<http://umpir.ump.edu.my/5180/1/CD6319.pdf>
15. Bull, T. (2000). *Manual of canegrowing. Ch. 04*. Recuperado de:
http://www.sugarresearch.com.au/icms_docs/166939_Chapter_4_The_Sugarcane_Plant.pdf
16. Netafim. La hoja. Recuperado de:
http://www.sugarcane crops.com/s/growth_morphology/the_leaf/
17. Padilla, J. A. y Correa, J. L. (1980). *La Industria de los Derivados de la Caña de Azúcar. Capítulo V. Utilización de los residuos*. Recuperado de:
https://www.academia.edu/10903426/LA_INDUSTRIA_DE_LOS_DERIVADOS_DE_LA_CA%C3%91A_DE_AZ%C3%9ACAR
18. Pettersen, R. (1984). The chemical composition of wood, chapter 2. *American Chemical Society*, 207(1), 984.
19. Rodríguez, I. (2006). Caracterización química de fibras de plantas herbáceas utilizadas para la fabricación de pastas de papel de alta calidad. (Tesis doctoral). Recuperada de:
[http://digital.csic.es/bitstream/10261/66200/1/Caracterizaci%C3%B3n%](http://digital.csic.es/bitstream/10261/66200/1/Caracterizaci%C3%B3n%20qu%C3%91mica%20de%20fibras%20de%20plantas%20herb%C3%A1ceas%20utilizadas%20para%20la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20pastas%20de%20papel%20de%20alta%20calidad.pdf)

20qu%C3%ADmica%20de%20fibras%20de%20plantas%20herb%C3%A1ceas.pdf

- 20.Princen, P. (2010). Composición química de diversos materiales lignocelulósicos de interés industrial y análisis estructural de sus ligninas. (Tesis de maestría). Recuperado de:
<https://digital.csic.es/bitstream/10261/66265/1/Composici%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20de%20diversos%20materiales%20lignocelul%C3%B3sicos.pdf>
- 21.Ferrer, A. (2003). Aprovechamiento integral del residuo de la industria del aceite de palma (efb). obtención de derivados de las hemicelulosas, pastas celulósicas y celulosa nanofibrilar. (Tesis Doctoral). Recuperado de: <http://helvia.uco.es/xmlui/handle/10396/10702>
- 22.Mayer, R. (1993). *Materiales y técnicas de arte, Quina edición*, Madrid España: Ed. Tursen.
- 23.Callapa, M. (2011). Obtención de papel a partir de los residuos de la cosecha del banano. (Tesis de pregrado). Recuperado de:
<https://es.scribd.com/document/88813352/Tesis-Obtencion-de-papel-a-partir-de-los-residuos-de-la-cosecha-del-banano>
- 24.Casey, J. (1990). Pulpa y papel. Vol. 1. México DF, México: Ed. LIMUSA.
- 25.Idem 24.
- 26.Idem 24
- 27.Paz, Y. (2011). Evaluación de las pulpas obtenidas a partir del pseudotallo de plátano para la elaboración de papel. (Tesis de pregrado).

- Recuperada de: http://tesis.luz.edu.ve/tde_arquivos/39/TDE-2014-05-29T15:41:50Z-4852/Publico/paz_gonzalez_yandrelis_teotiste.pdf
28. Tesis doctorales en red. Obtención de celulosa. Recuperado de: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8503/Fundamentos-5.pdf;jsessionid=7387E9C1210CD564875A86D4CCDBA370?sequence=4>
29. Casey, J. (1990). Pulpa y papel. Vol. 1. México DF, México: Ed. LIMUSA.
30. Borrero, J. (2013). Fibra de papel de alta resistencia a partir de hojas y cogollos de caña de azúcar. (Patente). Recuperado de: http://viceinvestigaciones.univalle.edu.co/documentos/tecnologias/Fibra_de_papel.pdf
31. Idem 24
32. Carrasco, L. (2005). Contaminantes ambientales derivados del pulpaje y blanqueo de la pulpa de madera. (Monografía). Recuperado de: http://www.rapaluruaguay.org/agrotoxicos/COPs/Prensa/Celulosa_Leonidas.pdf
33. Casey, J. (1990). Pulpa y papel. Vol. 1. México DF, México: Ed. LIMUSA.
34. Reddy, N. y Yang, Y. (2007). Preparation and characterization of long natural cellulose fibres from wheat straw. J. Agric. Food Chem, 55(21), 8570-8575. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass
35. Chen, X., Yu, J., Zhang, Z. y Lu, C. (2011). Study on structure and thermal stability properties of cellulose fibers from rice straw.

- Carbohydrate Polymers, 85(1), 245-250. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass
36. Reddy, N. y Yang, Y. (2005). Structure and properties of high quality natural cellulose fibers from cornstalks. Polymer, 46(1), 5494–5500. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass
37. Reddy, N. y Yang, Y. (2005). Properties and potential applications of natural cellulose fibers from cornhusks. Green Chem, 7(1), 190–195. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass
38. Reddy, N. y Yang, Y. (2007). Structure and properties of natural cellulose fibers obtained from sorghum leaves and stems. J. Agric. Food Chem, 55(14), 5569– 5574. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass
39. Sasa, S., Munawar, K. y Umemura, S. (2007). Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven non-wood plant fiber bundles. J. Wood Sci, 53(1), 108– 113. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass

40. Sinha, M. (1974). The use of banana-plant fibre as a substitute for jute. J. Textile Inst., 65(27), 27–33. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass
41. Costa, S., Mazzola, P., Silva, J., Pahl, R., Pessoa, Jr. A. y Costa, S. (2013). Use of sugar cane straw as a source of cellulose for textile fiber production. Industrial Crops and Products, 42, 189–194. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass
42. Bodors, E. y Baley, Ch. (2008). Study of the tensile properties of stinging nettle fibres. Mat. Lett., 62(14), 2143-2145. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/281308867_Studies_on_Isolation_of_Cellulose_Fibres_from_Waste_Plant_Biomass
43. Casey, J. (1990). Pulpa y papel. Vol. 1. México DF, México: Ed. LIMUSA.
44. Idem 24.
45. Chiluíza, C. I. y Hernández, J. P. (2006). Elaboración de papel artesanal de caña guadua (Guadua Agustifolia K.). (Tesis de grado). Recuperado de:
<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1901/1/CD-2457.pdf>
46. Prado, M., Anzaldo, J., Becerra, B., Palacios, H., Vargas, J. y Rentería, M. (2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. Madera y Bosques, 18(3), 37-51. Recuperado de:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712012000300004

47. Borgoño, A. (2006). Comportamiento pulpable de *Eucalyptus Nitens* normal y suprimido crecido en la X Región de Chile. (Tesis de pregrado).

Recuperado de:

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/fifb734c/doc/fifb734c.pdf>

48. Villaseñor, J. y Rutiaga, J. (2000). La madera de *Casuarina Equisetifolia* L., química e índices de calidad de pulpa. *Madera y bosques*, 6(1), 29-

40. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/html/617/61760103/>

49. Idem 48.

50. Prado-Martínez, M., J. Anzaldo-Hernández, B. Becerra-Aguilar, H. Palacios-Juárez, J.J. Vargas-Radillo y Maite Rentería Urquiza. (2012).

Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. *Madera y Bosques*

18(3),37-51. Recuperado de:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712012000300004

51. León, W. (2010). Anatomía y densidad o peso específico de la madera.

Revista Forestal Venezolana, 54(1), 67-76. Recuperado de:

<http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/31646/1/ensayo1.pdf>

52. Da Silva, E. (2009). *Curso de preparación de la pasta*. Recuperado de:

http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2009_Curso_Preparacion_Pasta.pdf

53. González Velandia, K. D., Daza Rey, D., Caballero Amado, P. A., y Martínez González, C. (2016). Evaluación de las propiedades físicas y químicas de residuos sólidos orgánicos a emplearse en la elaboración de papel. *Revista Luna Azul*, 43(1), 499-517. Recuperado de: http://200.21.104.25/lunazul/index.php?option=com_content&view=article&id=210
54. Rodríguez, I. (2006). Caracterización química de fibras de plantas herbáceas utilizadas para la fabricación de pastas de papel de alta calidad. (Tesis doctoral). Recuperado de: <http://digital.csic.es/bitstream/10261/66200/1/Caracterizaci%C3%B3n%20qu%C3%ADmica%20de%20fibras%20de%20plantas%20herb%C3%A1ceas.pdf>
55. Tamarit, J. (1996). Determinación de los índices de calidad de pulpa para papel de 132 maderas latifoliadas. *Madera y Bosques* 2(2), 29-41. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61720204>
56. Tomolang, F.N. y Wangaard, F.F. (1961). Relationships between hardwood fiber characteristics and pulp properties. *Rev. TAPPI*, 44(3), 201-216.
57. Borgoño, A. (2006). Comportamiento pulpable de *Eucalyptus Nitens* normal y suprimido crecido en la X Región de Chile. (Tesis de pregrado). Recuperado de: <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2006/fifb734c/doc/fifb734c.pdf>

58. Santiago, D., Rodríguez, N. y Mogollón, G. (2002). Potencial papelero de la fibra de sisal. *Rev. Forest. Venez.* 49(2), 19-27. Recuperado de: <http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/24344/2/articulo2.pdf>
59. Becerra, B., Zepeda, G., Sanjuan, R., Vargas, J. y Rentería, M. (2013). El árbol de majagua, *Heliocarpus Donnell Smothii*, como planta útil para la obtención de fibras celulósicas para papel de restauración y conservación. *Rev. Iberoam. Polím.*, 14(4), 153-171. Recuperado de: <http://www.ehu.eus/reviberpol/pdf/JUL13/becerra.pdf>
60. Davel, M., Jovanovski, A. y Mohr, D. (2005). Densidad básica de la madera de pino oregón y su relación con las condiciones de crecimiento en la Patagonia Andina Argentina. *Rev. Bosque*, 26(3), 55-62. Recuperado de: http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002005000300006
61. Earl, L. (1979). *Ciencia y tecnología sobre pulpa y papel. Tomo I: pulpa*. México DF, México: Ed. CECSA.
62. Morales, J. (2011). Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación. (Monografía). Recuperado de: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/32477/1/moralestrujillo.pdf>
63. Barroso, L, y Vilboa, I. (2013). Contaminación ambiental por quema de caña de azúcar: Un estudio exploratorio en la región central del estado de Veracruz. (Monografía). Recuperado de: http://www.igs.org.mx/sites/default/files/TG2013_Vilaboa_Barroso_0.pdf

64. Inga, J. (2003). La industria azucarera peruana, evolución y perspectivas. (Tesis pregrado). Recuperado de:
http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_115_43_73_1064.pdf
65. Carrere, R y Lohmann, L. (1996). El Papel del Sur: Plantaciones Forestales en la Estrategia Papelera Internacional. Rev. Watershed, 2(1), 1-13. Recuperado de:
http://wrm.org.uy/es/files/2013/04/Plantaciones_para_pulpa_de_papel.pdf
66. Curso virtual, Ministerio del Ambiente (2015). Recuperado de:
http://www.minam.gob.pe/proyecolegios/Curso/curso-virtual/Modulos/modulo2/3Secundaria/Actividades-Aprendizaje/EPT_1/S3/anexo3/EPT_S3_Anexo_3.pdf
67. Impacto Ambiental. Recuperado de:
<http://www.sc.ehu.es/iawfemaf/archivos/materia/industrial/libro-12.PDF>
68. Espinoza, C. (2010). Evaluación de los impactos de la producción de celulosa. Publicaciones Teram, Análisis de políticas públicas N°4, 1-12. Recuperado de: <http://wrm.org.uy/oldsite/paises/Chile/eia.pdf>
69. Ahumada, V. (2008). Influencia de la temperatura y proporciones de hidróxido de sodio y metanol en la producción de biodiesel a partir de aceite crudo de pescado. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque-Perú.

70. STATGRAPHICS® Centurion XVI. Manual de usuario. Recuperado de:
<http://www.statgraphics.net/wp-content/uploads/2015/03/Centurion-XVI-Manual-Principal.pdf>
71. P. Reyes. (2007). Diseños de experimentos factoriales 2k. Rev. Diseños factoriales, 1(1), 1-18. Recuperado de:
<https://es.scribd.com/document/270138071/EXPERIMENTOS-FACTORIALES-2K>
72. TAPPI N° 264 (2007). Preparation of wood for chemical analysis. Rev. TAPPI. T 264 cm-07, 1-4. Recuperado de:
<https://es.scribd.com/document/64530783/1-T264>
73. Carballo, L., Orea, U. y Cordero, E. (2004). Composición química de tres maderas en la provincia de pinar del río, cuba a tres alturas del fuste comercial. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 10(1), 57-62. Recuperado de:
<https://chapingo.mx/revistas/phpscript/download.php?file=completo&id=NTk5>
74. Buchanan, M. (2007). Solvent extractives of wood and pulp, TAPPI N° 204. Rev. TAPPI. T 204 cm-97, 1-12. Recuperado de:
<http://www.tappi.org/content/sarg/t204.pdf>
75. Idem 72
76. Niño, A. (1982). Manual de análisis para el análisis de nutrición, II parte. 20-23. Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Lambayeque-Perú.
77. BLAND, D. (1985). The composition and Analysis of eucalyptus Wood. *Rev. Appita*, 38(4), 291-294.

78. Fonseca, M. (2006). Determinación de la composición de la madera de Pino Candelillo (*Pinus maximinoi* H.E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz. (Tesis de pregrado). Recuperado de: biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0992_Q.pdf
79. Kraus, J. y Arduin, M. (1997). Manual básico de métodos en morfología vegetal. Sao Paulo, Brasil, Editora Universidadel Rural.
80. TAPPI N°258. (2006). Basic density and moisture content of pulpwood. Rev. Tappi N° 258 om-02, 1-11. Recuperado de: <http://www.tappi.org/content/SARG/T258.pdf>
81. Biermann, C. (1996). *Handbook of Pulping and Papermaking*. Recuperado de: https://books.google.com.pe/books?id=sfZfyEmqs_AC&pg=PA62&lpg=PA62&dq=total%20yield%20in%20pulp&source=bl&ots=ZXWdMEW97k&sig=1Z2VZ3eQojgmq8AqWOFyVheboWM&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjS8oHusvfRAhUIbiYKHQAHBkgQ6AEIOTA D#v=onepage&q=total%20yield%20in%20pulp&f=false
82. Ríos, S. y Vesga, S. (2008). Obtención y evaluación de pulpa a partir del raquis de la palma africana mediante los procesos de soda y soda-antraquinona. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga-Colombia.
83. Pasta y Papel. Recuperado de: www.clustermadeira.com/pdf/5_pasta_papel.pdf
84. Barahona, G. (2005). Variación de la composición química en albura, duramen y altura de madera pulpable de *Eucalyptus Globulus*

proveniente de monte alto y monte bajo (Tesis de pregrado). Recuperado de:

http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/105057/barahona_g.pdf?sequence

85. Shackford, L. (2003). A comparison of Pulping and Bleaching of Kraft Softwood and Eucaliptus Pulps. International Pulp and Paper Congress and Exhibition, Sao Paolo, Brazil. Recuperado de: <http://www.celsofoelkel.com.br/artigos/outros/A%20Comparison%20of%20Pulping%20and%20Bleaching%20of%20Kraft%20Softwood%20and%20Eucalyptus%20Pulps.pdf>

86. Programa estadístico de la FAO. Recuperado de:

<http://www.fao.org/faostat/en/#data>

87. Series históricas de producción agrícola, compendio estadístico. Recuperado de:

http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/?mod=consulta_cult

88. Meier, E. (2008-2016). The Wood database. Estados Unidos de América.

Recuperado de: <http://www.wood-database.com>

ANEXOS

ANEXO 1: PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR

Tabla 34*Producción mundial de caña de azúcar (tn) en los últimos años*

País	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Argentina	23960000	26960000	26960000	18889878	19806890	19766388	23700000	24596930
Australia	36397000	32621113	30284000	31457000	25181814	25957092	27136082	30518000
Brasil	549707328	645300182	691606147	717463793	734006059	721077287	768090444	737155724
China, Continental	112951000	124152400	115586706	110789000	114435000	123460496	128200912	125611300
Colombia	35200000	32300000	36700000	33300000	34889672	33363560	34874000	38157131
Cuba	11900000	15700000	14900000	11500000	15800000	14700000	16100000	17800000
Estados Unidos de América	27750600	25041020	27607450	24820574	26511598	29235840	27905910	28003890
Filipinas	32000000	34000000	32500000	28000000	30000000	32000000	31874000	32464000
India	355519700	348187900	285029300	292301600	342382016	361036992	341200000	352142000
México	52089356	51090721	49492695	50421620	49735272	50946484	61182076	56672829
Pakistán	54741600	63920000	500485400	49372900	55308500	58397000	63749900	67460000
Perú	8228623	9395959	9936945	9854961	9884936	10368866	10992240	11389617
Sudáfrica	1972400	19255404	18655089	16015605	16800000	17278000	18000000	18285760
Tailandia	64365482	73501611	66816446	68807800	95950416	98400465	100095580	103697005
Otros	343971018	352001575	347198069	342095977	344849197	365972049	380635508	382191129
Total	1.729E+09	1.853E+09	1.803E+09	1.805E+09	1.916E+09	1.962E+09	2.034E+09	2.026E+09

Nota. Recuperado de la base de datos de la FAO. 2017.⁸⁶

ANEXO 2: PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL PERÚ

Tabla 35

Producción de caña de azúcar (tn) a nivel nacional en los últimos años

Año	Ancash	Arequipa	La Libertad	Lambayeque	Lima	Total
2007	613892	116090	3760283	2056475	1681884	8228624
2008	628015	90685	4345865	2689532	1641862	9395959
2009	519197	67069	4807415	2982819	1560444	9936944
2010	578284	52947	4911755	2824848	1293061	9660895
2011	663722	50091	4977202	2748163	1445758	9884936
2012	722001	62380	5234476	2767051	1582958	10368866
2013	871827	97077	5398658	3046548	1578131	10992241
2014	857500	97595	5811760	2894565	1728196	11389616
2015	988272	56980	5529691	2022870	1614043	10211856

Nota. Recuperado de la base de datos de la OEEE (Cultivos) – Perú. 2017.⁸⁷

ANEXO 3: DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE HOJAS PRODUCIDAS A NIVEL MUNDIAL Y NACIONAL POR AÑO

Para conocer la cantidad de hojas que puede producirse anualmente en cada país se utilizó la siguiente formula:

$$Cantidad\ de\ hojas\ verdes\ (Tn) = \frac{A * B}{C}$$

Donde:

A: Porcentaje de cogollo y hojas verdes en una plata de caña de azúcar (8.44%).

B: Cantidad de tallos limpios producidos en un año.

C: Porcentaje de tallo en una planta de caña de azúcar (71.82%).

En el caso de Perú, se procedió de la siguiente manera:

Para el año 2014 se tuvo una producción de 11389617 toneladas de tallos limpios, aplicando la fórmula:

$$Cantidad\ de\ hojas\ verdes\ (Tn) = \frac{8.44 * 11389617}{71.82} = 1338462.37$$

El resultado es 1338462.37 toneladas de cogollo y hojas verdes.

Se repitió el mismo procedimiento para cada país y departamento de Perú tomados en cuenta para el estudio.

ANEXO 4: CÁLCULOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA (HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR)

4-1.- Porcentaje de humedad:

$$\%H = \left(\frac{A - B}{A} \right) * 100$$

Donde:

A: Peso muestra inicial

B: Peso muestra final

Muestra 1

$$M_1 = 35.00 - 33.77 = 1.23 \text{ g}$$

Peso muestra final: 1.23 g

$$\%H = \left(\frac{2.01 - 1.23}{2.01} \right) * 100 = 38.81\%$$

Muestra 2

$$M_2 = 36.41 - 35.22 = 1.19 \text{ g}$$

Peso muestra final: 1.19 g

$$\%H = \left(\frac{2.02 - 1.19}{2.02} \right) * 100 = 41.09\%$$

Muestra 3

$$M_3 = 35.61 - 34.42 = 1.19 \text{ g}$$

Peso muestra final: 1.19 g

$$\%H = \left(\frac{2 - 1.19}{2} \right) * 100 = 40.05\%$$

4-2.- Porcentaje de cenizas:

$$\%Cenizas = (P.B. - P.T.) * 100$$

Donde:

P.B.: Peso bruto

P.T.: Peso tara

Nota: La ecuación es válida solo si la muestra de madera utilizada es 1 gramo.

Muestra 1

$$\%Cenizas = (30.73 - 30.65) * 100 = 8\%$$

Muestra 2

$$\%Cenizas = (19.40 - 19.35) * 100 = 5\%$$

Muestra 3

$$\%Cenizas = (30.53 - 30.44) * 100 = 9\%$$

Nota: Para determinar los siguientes componentes de las hojas de caña de azúcar, se procedió a hacer un análisis sumativo, en donde cada prueba se realiza de forma secuencial considerando la prueba anterior.

4-3.- Porcentaje de extraíbles en agua:

$$\%Solubles = \frac{P}{W} * 100$$

Donde:

P: Peso perdido durante la determinación.

W: Peso de la muestra

Muestra 1

$$M_1 = 59.73 - 56.37 = 3.36 \text{ g}$$

Peso perdido durante la determinación: 3.36 g

$$\%Solubles = \left(\frac{4 - 3.36}{4} \right) * 100 = 16\%$$

Muestra 2

$$M_2 = 38.51 - 35.23 = 3.28 \text{ g}$$

Peso perdido durante la determinación: 3.28 g.

$$\%Solubles = \left(\frac{4 - 3.28}{4} \right) * 100 = 18\%$$

Muestra 3

$$M_3 = 66.74 - 63.45 = 3.29 \text{ g}$$

Peso perdido durante la determinación: 3.29 g

$$\%Solubles = \left(\frac{4 - 3.29}{4} \right) * 100 = 17.75\%$$

Promedio

$$\bar{M} = \frac{16 + 18 + 17.75}{3} = 17.25$$

4-4.- Porcentaje de extraíbles orgánicos:

$$\%Extraibles = \left(\frac{W_e - W_m}{W_e} \right) * 100$$

Donde:

We: Peso de la muestra.

Wm: Peso de la muestra final.

Muestra 1

$$M_1 = 90.18 - 86.36 = 3.82 \text{ g}$$

Peso de la muestra final: 3.82 g

$$\%Extraibles = \left(\frac{4 - 3.82}{4} \right) * 100 = 4.5\%$$

Muestra 2

$$M_2 = 67.23 - 63.47 = 3.47 \text{ g}$$

Peso de la muestra final: 3.47 g

$$\%Extraibles = \left(\frac{4 - 3.76}{4} \right) * 100 = 6\%$$

Muestra 3

$$M_3 = 90.14 - 86.36 = 3.78 \text{ g}$$

Peso de la muestra final: 3.77 g

$$\%Extraibles = \left(\frac{4 - 3.78}{4} \right) * 100 = 5.5\%$$

Los porcentajes obtenidos de extraíbles orgánicos se determinaron considerando la fracción que quedó del porcentaje total después del análisis anterior, por lo que fue necesario conocer el porcentaje para el 100%. Esta operación se hizo de la siguiente manera:

$$\text{Fracción del porcentaje total} = 100 - 17.25 = 82.75\%$$

Muestra 1

$$4.50\% - - - - 82.75\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{4.5 * 82.75}{100} = 3.72\%$$

Muestra 2

$$6\% - - - - 82.75\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{6 * 82.75}{100} = 4.97\%$$

Muestra 3

$$5.5\% - - - - 82.75\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{5.5 * 82.75}{100} = 4.55\%$$

Promedio

$$\bar{M} = \frac{3.72 + 4.97 + 4.55}{3} = 4.41\%$$

5-5.- Porcentaje de lignina:

$$\%Lignina = \frac{(A - B)}{A} * 100$$

Donde:

A: Peso de la muestra

B: Peso de residuo

Muestra 1

$$M_1 = 34.5815 - 33.8081 = 0.7734 \text{ g}$$

Peso de residuo: 0.7734 g

$$\%Lignina = \left(\frac{1 - 0.7734}{1} \right) * 100 = 22.66\%$$

Muestra 2

$$M_2 = 34.3199 - 33.5946 = 0.7253 \text{ g}$$

Peso de residuo: 0.7253 g

$$\%Lignina = \left(\frac{1 - 0.7253}{1} \right) * 100 = 27.47\%$$

Muestra 3

$$M_3 = 34.8663 - 34.1713 = 0.6950 \text{ g}$$

Peso de residuo: 0.7734 g

$$\%Lignina = \left(\frac{1 - 0.6950}{1} \right) * 100 = 30.5\%$$

Promedio

$$\bar{M} = \frac{22.66 + 27.47 + 30.5}{3} = 26.88\%$$

Los porcentajes obtenidos de lignina se determinaron considerando la fracción del porcentaje del total después análisis anterior, por lo que fue necesario conocer el porcentaje para el 100%. Esta operación se hizo de la siguiente manera:

$$\text{Fracción del porcentaje total} = 100 - (17.25 + 4.41) = 78.34\%$$

Muestra 1

$$22.66\% - - - - 78.34\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{22.66 * 78.34}{100} = 17.75\%$$

Muestra 2

$$27.47\% - - - - 78.34\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{27.47 * 78.34}{100} = 21.52\%$$

Muestra 3

$$30.5\% - - - - 78.34\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{30.5 * 78.34}{100} = 23.89\%$$

Promedio

$$\bar{M} = \frac{17.75 + 21.52 + 23.89}{3} = 21.05\%$$

6-6.- Porcentaje de celulosa:

$$\%Celulosa = \frac{(A - B)}{C} * 100$$

Donde:

A: Peso de residuo en tratamiento de lignina

B: Peso de residuo en tratamiento de celulosa

C: Peso de muestra en tratamiento de lignina

Muestra 1

$$M_1 = 28.5842 - 28.4367 = 0.1475 \text{ g}$$

Peso de residuo: 0.1475 g

$$\%Celulosa = \left(\frac{0.7734 - 0.1475}{1} \right) * 100 = 62.59\%$$

Muestra 2

$$M_2 = 25.9733 - 25.8754 = 0.0979 \text{ g}$$

Peso de residuo: 0.0979 g

$$\%Celulosa = \left(\frac{0.7253 - 0.0979}{1} \right) * 100 = 62.74\%$$

Muestra 3

$$M_3 = 23.8677 - 23.7768 = 0.0909 \text{ g}$$

Peso de residuo: 0.0909 g

$$\%Celulosa = \left(\frac{0.6950 - 0.0909}{1} \right) * 100 = 60.41\%$$

Promedio

$$\bar{M} = \frac{62.59 + 62.74 + 60.41}{3} = 61.91\%$$

Los porcentajes obtenidos de celulosa se determinaron considerando la fracción del porcentaje del total después análisis anterior, por lo que fue necesario conocer el porcentaje para el 100%. Esta operación se hizo de la siguiente manera:

$$\text{Fracción del porcentaje total} = 100 - (17.25 + 4.41 + 21.05) = 57.28\%$$

Muestra 1

$$62.59\% - - - - 57.28\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{62.59 * 57.28}{100} = 35.85\%$$

Muestra 2

$$62.74\% - - - - 57.28\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{62.74 * 57.28}{100} = 35.94\%$$

Muestra 3

$$60.41\% - - - - 57.28\%$$

$$X - - - - 100\%$$

$$X = \frac{60.41 * 57.28}{100} = 34.60\%$$

Promedio

$$\bar{M} = \frac{35.85 + 35.94 + 34.60}{3} = 35.47\%$$

8-7.- Porcentaje de hemicelulosa:

$$\%Hemicelulosa = 100 - (\%Lignina + \%Celulosa)$$

$$\%Hemicelulosa = 100 - (26.88 + 61.91) = 11.21\%$$

8-8.- Porcentaje de otros:

$$\begin{aligned} \%Otros = 100 - (\%Lignina + \%Celulosa + \%Hemicelulosa + \%EA + \%EO \\ + \%Cenizas) \end{aligned}$$

$$\%Otros = 100 - (21.05 + 35.47 + 11.21 + 17.25 + 4.41 + 7.3) = 3.27\%$$

ANEXO 5: IMÁGENES DEL PROCESO PREVIO A LA OBTENCIÓN DE PULPA A PARTIR DE LAS HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR

1. Recolección de la materia prima

Se cortaron las hojas de caña de azúcar desde la parte inferior sin tomar la vaina de la misma, y se realizó en forma aleatoria a lo largo de toda la plantación para tomar muestras homogéneas.



Figura 18. Recolección de hojas de caña de azúcar. 2017.

2. Lavado y secado

Se lavaron las hojas para extraer cualquier impureza (tierra, telas de araña, insectos, etc.), luego se secó al aire libre hasta que quede sin agua.



Figura 19. Lavado de las hojas de caña de azúcar. 2017

3. Acondicionamiento de las hojas de caña de azúcar

Cuando las hojas han secado se procede a quitar la nervadura central, pues solo necesitamos la lámina de la hoja.



Figura 20. Acondicionamiento de las hojas de caña de azúcar. 2017.

ANEXO 6: IMÁGENES DEL PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE PULPA A PARTIR DE LAS HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR

1. Cortado de hojas 1:



Figura 21. Hojas de caña de azúcar en proceso de cortado. 2017

2. Secado de hojas:



Figura 22. Hojas de caña de azúcar en proceso de secado. 2017

3. Cortado de hojas 2:



Figura 23. Hojas de caña de azúcar de tamaño 2 cm. 2017



Figura 24. Hojas de caña de azúcar de tamaño 0.5 cm. 2017.

4. Molienda de hojas:



Figura 25. Hojas de caña de azúcar en el proceso de molienda. 2017.

5. Tamizado de hojas:



Figura 26. Hojas de caña de azúcar en el proceso de tamizado. 2017.



Figura 27. Hojas de caña de azúcar de tamaño 0.1 cm. 2017.

6. Mezclado:



Figura 28. Pesado de hojas de caña de azúcar. 2017.



Figura 29. Adicionamiento del Na(OH). 2017

7. Deslignificación:



Figura 30. Proceso de cocción de las hojas de caña de azúcar. 2017.

8. Lavado/Secado de la Pulpa:



Figura 31. Lavado de la pulpa con agua destilada. 2017.



Figura 32. Pulpa húmeda antes de entrar a estufa. 2017.



Figura 33. Pulpa seca. 2017.

ANEXO 7: DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL PULPAJE DE LAS HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR

El objetivo es obtener el rendimiento para cada experimento y para ello se utilizó la siguiente formula:

$$\%Rendimiento = \frac{Peso\ final}{Peso\ inicial} * 100$$

Se pesaron 5 gramos de hojas de caña de azúcar en seco y se sometieron a los parámetros establecidos para cada experimento.

Para el experimento número 1 del ensayo 1, se hizo de la siguiente manera:

Tabla 36

Parámetros de las variables de la primera muestra

Experimento	Temperatura	Cc. Na(OH)	Tam. Part.	Tiempo
M1	150 °C	5%	0.1 cm	1 h

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

La cantidad de hojas cocidas (pulpa) fue de 0.91 gramos.

Se procedió de la misma manera para los ensayos 2 y 3, dando como resultado de cantidad de pulpa de 1.07 y 1.68 gramos respectivamente, que se muestran en la tabla 20.

Se hicieron estos tres ensayos para obtener datos más acertados, es por ello que se calculó el rendimiento con el promedio de estos tres, dando como resultado 1.22 gramos.

$$\%Rendimiento = \frac{1.22}{5} * 100 = 24.41\%$$

Se consideró un porcentaje de error de 20% por las siguientes razones:

- No se utilizó un biodigestor.
- Hubo pérdida de muestra en el lavado.

Por consiguiente, el rendimiento real y el cual se consideró para el análisis estadístico fue hallado de la siguiente manera:

$$\%Error = \frac{\% Rendimiento Corregido - \% Rendimiento}{\% Rendimiento Corregido}$$

Entonces el rendimiento corregido es:

$$20 = \left(\frac{X - 24.41}{X} \right) * 100$$

$$\% Rendimiento Corregido = 30.51\%$$

El mismo procedimiento se hizo para cada experimento en cada ensayo.

**ANEXO 8: TABLA DEL DIMENSIONAMIENTO DE ALGUNAS ESPECIES DE ÁRBOLES MÁS USADAS EN LA
OBTENCIÓN DE PULPA DE CELULOSA**

Tabla 37

Principales indicadores para caracterizar la fibra en la industria pastero-papelera

	Eucalyptus Globulus	Eucalyptus Camaldulensis	Eucalyptus Grandis	Eucalyptus Saligna	Betula Pendula
Longitud de fibra (L), mm	1.05	0.81	1.02	0.83	1.25
Espesor de pared (e), μm	4.2	4.3	2.8	3	3.1
Anchura de fibra (a), μm	19	16	22	17	18
Relación longitud/anchura	55	51	46	49	69
Anchura de lumen (lu), μm	10.5	8	17	11	9.8
Índice Runkel (2e/lu)	0.8	1.08	0.33	0.55	0.63
Coef. flexibilidad (100 lu/a)	55	50	77	65	54
Proporción pared (100 2e/a)	44	54	25	35	34

Nota. Recuperado del Centro de Investigación de ENCE (CIE). 2010.

ANEXO 9: IMÁGENES DE LAS DIMENSIONES DE LA FIBRA DE LAS HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR (100X)

1. Diámetro de la fibra:

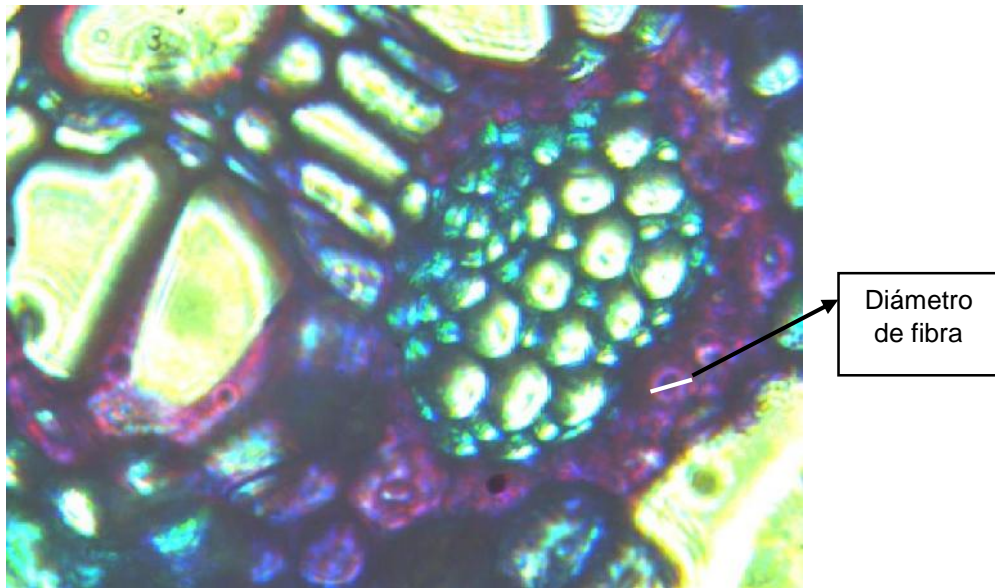


Figura 34. Diámetro de la fibra de la hoja de caña de azúcar. 2017.

2. Diámetro del lumen:

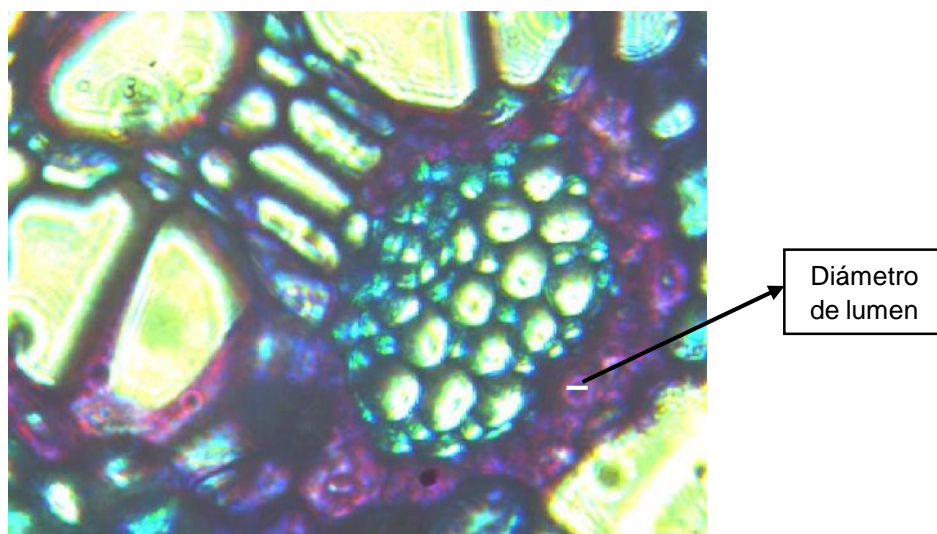


Figura 35. Diámetro de lumen de la fibra de la hoja de caña de azúcar. 2017.

3. Grosor de la pared celular:

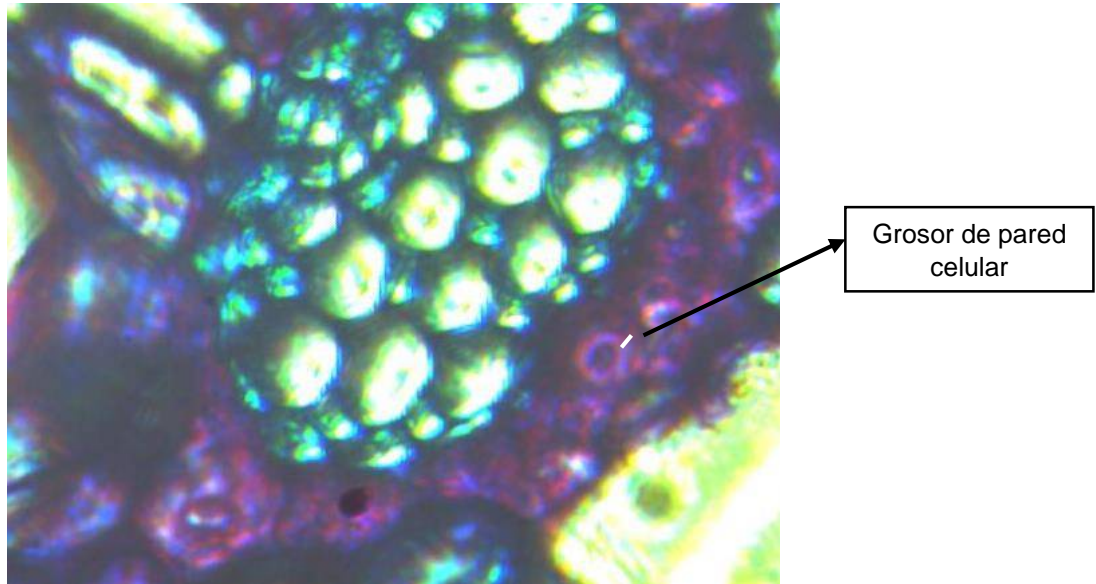


Figura 36. Grosor de la pared celular de la hoja de caña de azúcar. 2017.

4. Largo de la fibra:

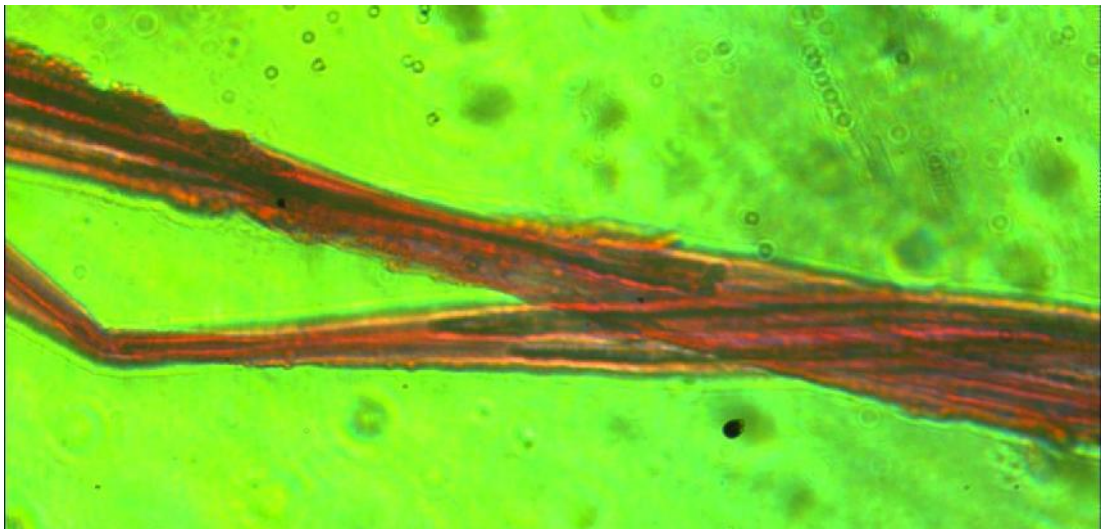


Figura 37. Largo de la fibra (paquete de fibras) de la hoja de caña de azúcar. 2017.

ANEXO 10: CÁLCULOS DE LA DENSIDAD DE HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR Y LOS ÍNDICES LA CALIDAD EN PULPA A PARTIR DEL DIMENSIONAMIENTO DE LAS HOJAS DE CAÑA DE AZÚCAR.

10-1.- Densidad de hojas de caña de azúcar:

Ecuación para hallar la densidad básica:

$$D_b = \frac{A}{B}$$

Donde:

A: Peso seco de la muestra (g)

B: Volumen verde de la muestra (cm³)

Db: Densidad básica (g/cm³)

Muestra 1

Volumen de la muestra = Peso de líquido desplazado

$$Volumen de la muestra = \frac{0.30 + 0.46 + 0.44}{3} ml$$

$$Volumen de la muestra = 0.4 ml$$

$$Peso seco de la muestra = \frac{0.098 + 0.117 + 0.13}{3} g$$

$$Peso seco de la muestra = 0.115 g$$

La densidad de la muestra es:

$$D_b = \frac{0.115}{0.4} = 0.288 \text{ g/cm}^3$$

Muestra 2

Volumen de la muestra = Peso de liquido desplazado

$$\text{Volumen de la muestra} = \frac{0.52 + 0.36 + 0.31}{3} \text{ ml}$$

$$\text{Volumen de la muestra} = 0.397 \text{ ml}$$

$$\text{Peso seco de la muestra} = \frac{0.099 + 0.095 + 0.125}{3} \text{ g}$$

$$\text{Peso seco de la muestra} = 0.106 \text{ g.}$$

La densidad de la muestra es:

$$D_b = \frac{0.106}{0.397} = 0.288 \text{ g/cm}^3$$

Muestra 3

Volumen de la muestra = Peso de liquido desplazado

$$\text{Volumen de la muestra} = \frac{0.43 + 0.38 + 0.35}{3} \text{ ml}$$

$$\text{Volumen de la madera} = 0.387 \text{ ml}$$

$$\text{Peso seco de la muestra} = \frac{0.114 + 0.123 + 0.096}{3} \text{ g}$$

$$\text{Peso seco de la muestra} = 0.111 \text{ g}$$

La densidad de la muestra es:

$$D_b = \frac{0.111}{0.387} = 0.287 \text{ g/cm}^3$$

Entonces la densidad promedio total es:

$$\text{Densidad promedio} = \frac{0.288 + 0.288 + 0.287}{3} \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densidad promedio} = 0.287 \text{ g/cm}^3$$

10-2.- Índices de calidad en pulpa:

Los índices de calidad en pulpa se hallan a partir del dimensionamiento de las fibras de hojas de caña de azúcar. Se hicieron 3 mediciones en cada tratamiento, para luego sacar un promedio total.

Muestra 1

Tabla 38

Dimensionamiento de fibra (μm) de la muestra 1

Dimensionamiento	Valor	Promedio
Largo de fibra (μm)	20000	20000
	20000	
	20000	
Diámetro de fibra (μm)	12.45	12.28
	11.02	
	13.37	
Diámetro de lumen (μm)	8.26	8.21
	8.71	
	7.65	
Grosor de la pared celular (μm)	2.09	1.98
	1.06	
	2.80	

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

Muestra 2

Tabla 39

Dimensionamiento de fibra (μm) de la muestra 2

Dimensionamiento	Valor	Promedio
Largo de fibra (μm)	5000	5000
	5000	
	5000	
Diámetro de fibra (μm)	11.22	12.28
	13.75	
	11.86	
Diámetro de lumen (μm)	7.10	7.26
	7.55	
	7.12	
Grosor de la pared celular (μm)	2.07	2.45
	3.01	
	2.26	

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

Muestra 3

Tabla 40

Dimensionamiento de fibra (μm) de la muestra 3

Dimensionamiento	Valor	Promedio
Largo de fibra (μm)	1000	1000
	1000	
	1000	
Diámetro de fibra (μm)	12.64	12.23
	12.76	
	11.13	
Diámetro de lumen (μm)	8.31	8.05
	7.54	
	8.31	
Grosor de la pared celular (μm)	2.16	2.07
	2.55	
	1.49	

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

Luego se calcularon los promedios total de cada una de las medidas tomadas.

Tabla 41*Promedio total del dimensionamiento (μm)*

Dimensionamiento	Promedio	Promedio Corregido
Largo de fibra (μm)	8666.67	7800.03
Diámetro de fibra (μm)	12.26	11.03
Diámetro de lumen (μm)	7.84	8.71
Grosor de la pared celular (μm)	2.16	1.19

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

La longitud de la fibra es del tamaño de la muestra que mayor rendimiento brindó

Con estos valores se determinaron los coeficientes:

1. Coeficiente de Flexibilidad (C.F.)

$$C.F. = \frac{l}{D}$$

Donde:

D: Diámetro de la fibra

l: Diámetro del lumen

$$C.F. = \frac{8.71}{11.03}$$

$$C.F. = 0.79$$

2. Coeficiente de Rigidez (C.R.)

$$C.R. = \frac{2w}{D}$$

Donde:

D: Diámetro de la fibra

w: Grosor de la pared de la fibra

$$C.R. = \frac{2 * 1.19}{11.03}$$

$$C.R. = 0.22$$

3. Coeficiente de Peteri (C.P.)

$$C.P. = \frac{L}{D}$$

Donde:

D: Diámetro de la fibra

L: Longitud de la fibra

$$C.P. = \frac{7800.03}{11.03}$$

$$C.P. = 707.17$$

4. Relación de Runkel (R.R.)

$$R.R. = \frac{2w}{l}$$

Donde:

l : Diámetro del lumen

$2w$: Grosor de la pared de la fibra

$$R.R. = \frac{2 * 1.19}{8.71}$$

$$R.R. = 0.27$$

ANEXO 11: CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PULPA KRAFT A PARTIR DE MADERA

La tabla 37 muestra el contenido de celulosa y lignina que tiene la típica madera blanda (Pino) y la típica madera dura (Abedul) usadas en la industria pastero-papelera, así como también muestra la composición de estas maderas luego del pulpaje Kraft.

Tabla 42

Composición de madera y pulpa no blanqueada expresada en porcentaje de madera original (%)

Componentes	Componentes de madera		Componentes de pupa Kraft	
Madera	Pino	Abedul	Pino	Abedul
Celulosa (%)	38-40	40-41	35	34
Lignina (%)	27-29	20-22	2-3	1.5-2

Nota. Recuperado de “A comparison of Pulping and Bleaching of Kraft Softwood and Eucaliptus Pulps”. Shackford, L. 2003. International Pulp and Paper Congress and Exhibition, Sao Paolo, Brazil.

Considerando una muestra de 5 gramos de madera, se calculó la cantidad de pulpa obtenida con un rendimiento de 40% para el pulpaje kraft.

$$\text{Cant. Pulpa para Pino} = 5x * 0.40 = 2 \text{ g}$$

$$\text{Cant. Pulpa para Abedul} = 5 * 0.40 = 2 \text{ g}$$

Teniendo en cuenta estos datos, se puede calcular la cantidad de celulosa y lignina que tiene la pulpa kraft.

$$\text{Cant. Celulosa para Pino} = 5 * 0.35 = 1.75 \text{ g}$$

$$\text{Cant. Lignina para Pino} = 5 * \frac{2 + 3}{2} = 0.125 \text{ g}$$

$$\text{Cant. Celulosa para Abedul} = 5 * 0.34 = 1.70 \text{ g}$$

$$\text{Cant. Lignina para Abedul} = 5 * \frac{1.5 + 2}{2} = 0.088 \text{ g}$$

Tabla 43

Cantidad de celulosa y lignina en pulpa (g) para Pino y Abedul

	Pino	Abedul
Celulosa (g)	1.75	1.7
Lignina (g)	0.125	0.088

Nota. Elaborada por los autores. 2017.

Para poder calcular el porcentaje de celulosa y lignina que hay en la pulpa expresada solo en pulpa, se procede de la siguiente manera:

$$\% \text{Celulosa para Pino} = \frac{1.75}{2} * 100 = 87.50\%$$

$$\% \text{Lignina para Pino} = \frac{0.125}{2} * 100 = 6.25\%$$

$$\% \text{Celulosa para Abedul} = \frac{1.70}{2} * 100 = 85.00\%$$

$$\% \text{Lignina para Abedul} = \frac{0.088}{2} * 100 = 4.38\%$$

En la tabla 38 se muestra el porcentaje de celulosa y lignina en la pulpa kraft no blanqueada expresada en porcentaje de pulpa

Tabla 44

Composición química de pulpa kraft no blanqueada (%)

	Pino	Abedul
Celulosa (%)	87.50	85.00
Lignina (%)	6.25	4.38

Nota. Elaborada por los autores. 2017

ANEXO 12: CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE PULPA OBTENIDA DE UN ÁRBOL

El *Eucalyptus Saligna* es una variedad de árbol que es utilizado en la industria de papel, el mismo que en la literatura citada es el que mayor dimensiones tiene como se muestra a continuación.

Tabla 45

Dimensiones (m) y densidad (kg/m³) del Eucalyptus Saligna

	Altura (m)	Diámetro (m)	Densidad (kg/m ³)
Max.	30	2	820
Min.	55	2.5	
Promedio	42.5	2.25	

Nota. Recuperado de "The Wood database". Meier, E. 2016.⁸⁸

Cálculo del volumen del árbol:

$$V = \frac{\pi}{4} * D^2 * H$$

$$V = \frac{3.1416}{4} * 2.25^2 * 42.5 = 169 \text{ m}^3$$

Cálculo del peso del árbol:

$$D = \frac{M}{V} \rightarrow M = D * V$$

$$M = 820 * 169 = 138566 \text{ kg} = 138.5 \text{ Tn}$$

De esta variedad de árbol se obtienen 138.5 toneladas de madera, la cual se convertirá en pulpa para obtener papel. En este caso se utilizó el método a la sosa, que tiene un rendimiento máximo de 55% (Tabla 11).

Cálculo de cantidad de pulpa:

$$Cant. Pulpa = Rendimiento * Cant. Madera$$

$$Cant. Pulpa = 0.55 * 138.57$$

$$Cant. Pulpa = 76.21 Tn$$

Con la cantidad de pulpa en toneladas que se produce de un árbol (Eucaliptus Saligna), podemos saber cuántas hojas de caña de azúcar se necesitan para obtener la misma cantidad de pulpa; para ello utilizamos el rendimiento experimental que resultó del pulpaje de las hojas de caña de azúcar.

$$Cant. Hojas de caña de azúcar = \frac{Cant. Pulpa}{Rendimiento Experimental / 100}$$

$$Cant. Hojas de caña de azúcar = \frac{76.21 Tn}{34.4 / 100}$$

$$Cant. Hojas de caña de azúcar = 221.54 Tn$$

Tabla 46*Superficie cosechada de caña de azúcar (ha) en los últimos años*

Años	ANCASH	AREQUIPA	LA LIBERTAD	LAMBAYEQUE	LIMA	Total
2007	5588.0	769.0	29135.0	20002.0	12459.0	67953.0
2008	5955.0	903.0	28731.0	21609.0	11928.0	69126.0
2009	5105.0	690.0	32367.0	25927.0	11260.0	75349.0
2010	5174.0	638.0	34235.0	26773.0	10163.0	76983.0
2011	5132.0	539.0	37454.0	25317.0	11627.0	80069.0
2012	5684.0	599.0	37043.0	25710.0	12089.0	81125.0
2013	6142.0	734.0	35394.0	28753.0	11182.0	82205.0
2014	5860.0	892.0	38790.0	32418.0	12396.0	90356.0
2015	6594.0	630.0	40928.0	23430.0	12992.0	84574.0

Nota. Recuperado de la base de datos de la OEEE (Cultivos) – Perú. 2017.

La ciudad de Lambayeque produce 313805.24 Tn. de hojas de caña de azúcar al año (Tabla 5) en 25548.78 Ha (Tabla 41) de superficie cosechada, por lo tanto podemos saber cuánto produce una ha/por año:

$$313805.24 \text{ Tn} \text{ — — — — — } 25548.78 \text{ ha}$$

$$x \text{ Tn} \text{ — — — — — } 1 \text{ ha}$$

$$\text{Tn} \frac{\text{hojas caña azúcar}}{\text{ha}} = \frac{1 * 313805.24}{25548.78}$$

$$\frac{\text{Tn hojas caña azúcar}}{\text{ha}} = 12.28$$

Entonces para producir la misma cantidad de pulpa proveniente de un árbol, con hojas de caña de azúcar se necesita 221.54 Tn. de las mismas, y se sabe que una Ha. cosechada equivale a 12.28 Tn. de hojas de caña de azúcar, calculamos la cantidad de Ha. que se necesitan para producir lo mismo que un árbol como el Eucaliptus Saligna:

$$1 \text{ Ha.} \text{ — — — — — } 12.28 \text{ Tn. hojas de caña de azúcar}$$

$x \text{ Ha.} - - - - - 221.54 \text{ Tn. hojas de caña de azúcar}$

$$x = \frac{1 \text{ Ha.} * 221.54 \text{ Tn.}}{12.28 \text{ Tn.}}$$

$$x = 18 \text{ Ha.}$$

Esto quiere decir que:

1 árbol produce la misma cantidad de pulpa que 18 Ha. de superficie

cosechada de caña de azúcar

En el Perú se cosecharon en promedio 78637 Ha. por año del 2007 al 2014,
este dato equivale a aproximadamente 4368 árboles del tipo Eucaliptus

Saligna que no se hubieran talado.

ANEXO 13: IMÁGENES DE LOS EQUIPOS USADOS EN ÉSTA INVESTIGACIÓN

1. Estufa:

Marca: MEMERT

Modelo: UNB 200



Figura 38. Estufa. 2017

2. Mufla:

Marca: THERMOSCIENTIFIC

Modelo: F48010 – 33



Figura 39. Mufla. 2017

3. Cocina:

Marca: FINEZZA

Modelo: FZ – 204D4CH



Figura 40. Cocina eléctrica. 2017.

4. Balanza analítica:

Marca: BH

Modelo: BH 300



Figura 41. Balanza analítica. 2017.

5. Licuadora:

Marca: OSTERIZER



Figura 42. Licuadora. 2017.

6. Microscopio Binocular:

Marca: LABOMED

Modelo: CxL



Figura 43. Microscopio binocular. 2017.

7. Cámara:

Marca: TUCSEN

Modelo: 5.0 Mega CMOS



Figura 44. Cámara para microscopio. 2017.

ANEXO 14: PROGRAMAS USADOS EN ÉSTA INVESTIGACIÓN

1. Microsoft Excel 2013:

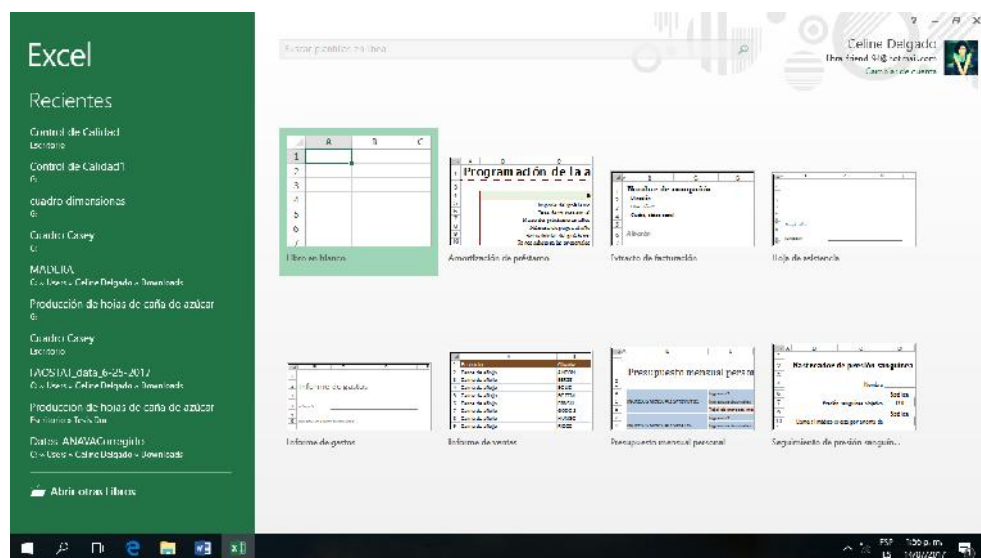


Figura 45. Interfaz del programa Microsoft Excel 2013.

2. Microsoft Word 2013:

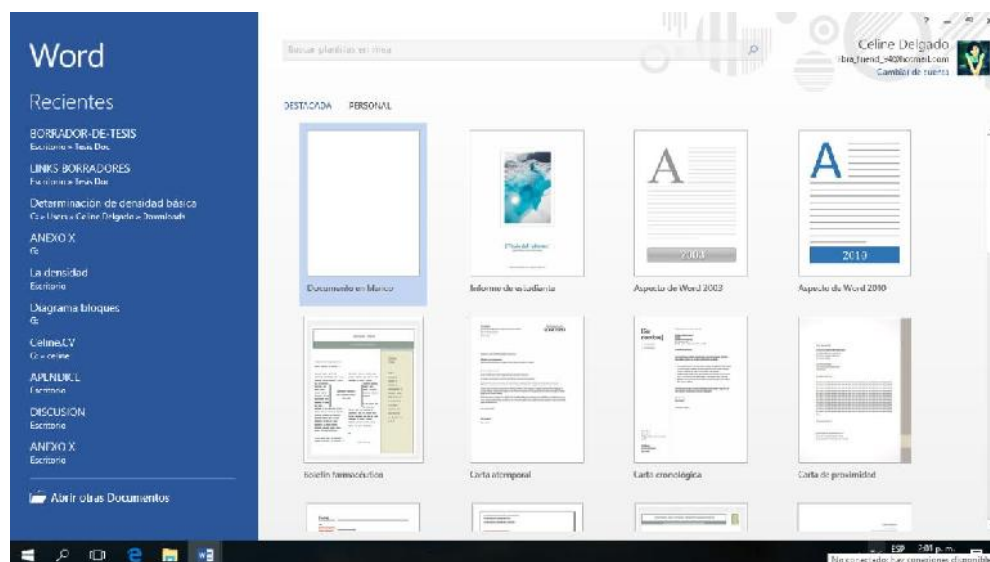


Figura 46. Interfaz del programa Microsoft Word 2013.

3. STATGRAPHICS CENTURION XVI.I:

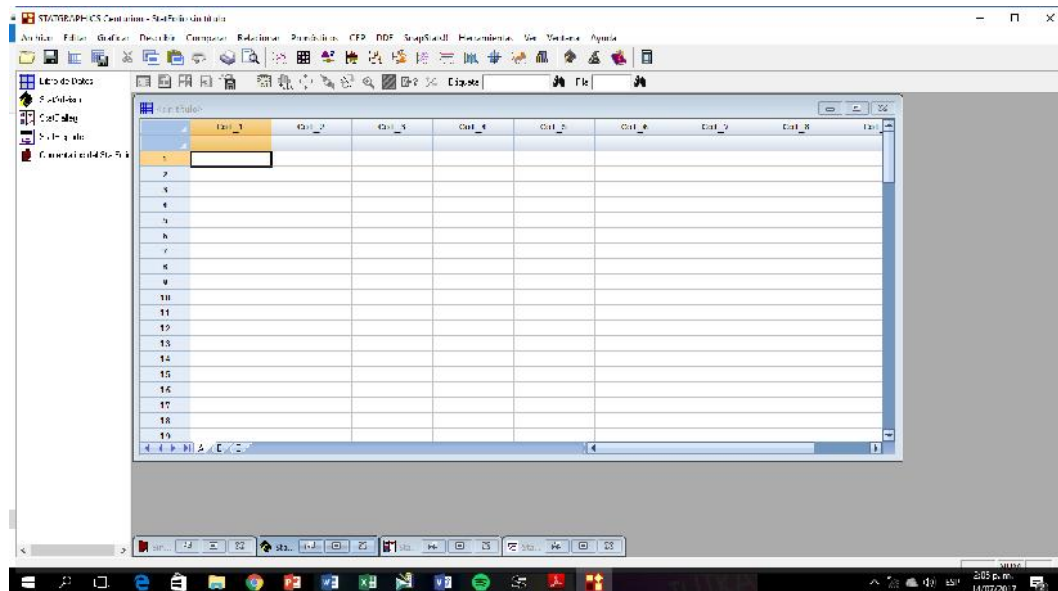


Figura 47. Interfaz del programa STATGRAPHICS CENTURION XVI.I.

4. Motic Images Plus 2.0 ML:

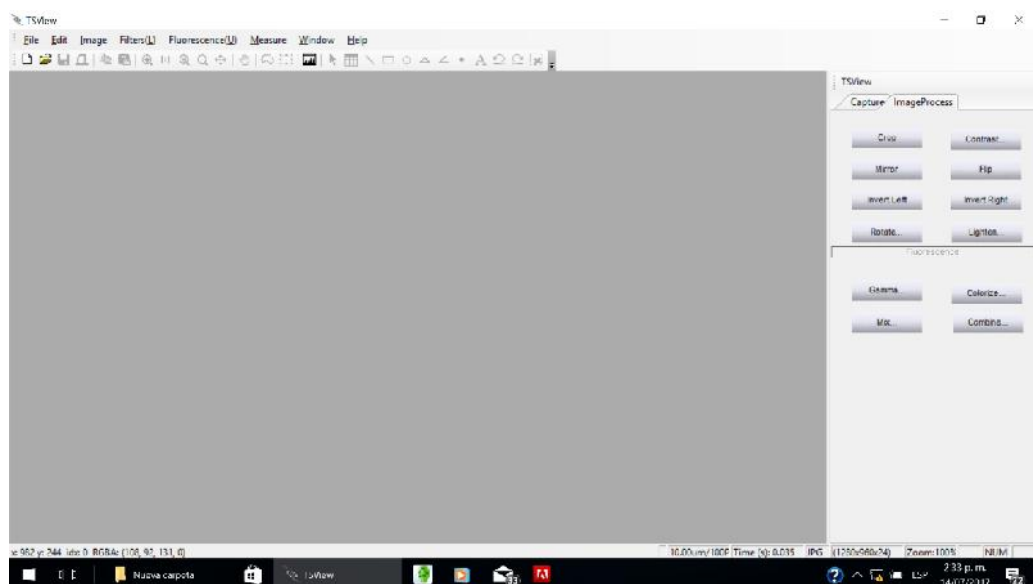


Figura 48. Interfaz del programa Motic Images Plus 2.0 ML.