

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

Facultad de Ciencias Forestales



**ESTUDIO DE TRES VARIABLES EN LA OBTENCIÓN DE
PULPA CELULÓSICA, CON PROCESO DE ALTO
RENDIMIENTO, A PARTIR DEL TALLO DE ARROZ
(ORYZA SATIVA L.)**

Tesis para optar el Título de

INGENIERO FORESTAL

VERÓNIKHA ESPERANZA SALDÍVAR CHEA

Lima –Perú

2005

RESUMEN

En el presente estudio se evalúa la influencia de tres variables en la obtención de pulpa celulósica, mediante un proceso de alto rendimiento, a partir del tallo del arroz (*Oryza sativa* L.). Se caracterizó químicamente a la materia prima y se evaluaron las aptitudes papeleras de la pulpa obtenida, comparando los resultados obtenidos con los valores de papeles utilizados en la industria del cartón corrugado.

Las variables del proceso estudiadas son: **concentración del reactivo** (NaOH), a 3 diferentes concentraciones (0, 2 y 4%); **temperatura del agua** utilizada en el desfibrado 20°C y 80°C en promedio (agua fría y caliente respectivamente) y; **grado de refinado** al que se somete a la pulpa medido por número de vueltas (0, 500 y 1000 vueltas).

En el procedimiento del estudio se sometió la materia prima a un pre-tratamiento químico, durante 24 horas a temperatura ambiente en una solución de NaOH; posteriormente, se lavó la paja tratada y pasó por dos etapas de desfibrado. El material luego es pasado por un tamiz con aberturas de 0.5 mm, obteniéndose así la pulpa lista para refinar. Se formaron hojas de papel para ensayo de la pulpa obtenida, se acondicionaron en un ambiente a 20°C y 65% de humedad relativa, y se procedió a evaluar sus aptitudes papeleras.

El contenido de celulosa y lignina presentes en las pajas de arroz es similar al de las maderas latifoliadas. Por otro lado, se encontró que la influencia de las variables concentración de reactivo, temperatura del agua y grado de refinado impactaron positivamente en las propiedades de resistencia de los papeles.

Así mismo, se pasó a corrugar el papel de paja de arroz, observándose que tiene aptitudes para formar la onda pudiéndose utilizar en la industria del cartón corrugado.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 DESCRIPCIÓN DE LAS FIBRAS PARA PAPEL.....	3
2.1.1 <i>Materias Primas para obtención de fibras</i>	3
2.1.2 <i>Fibras madereras</i>	4
2.1.3 <i>Fibras no madereras</i>	5
<i>África</i>	6
2.1.3.1 <i>Fibras de residuos agrícolas: Generalidades</i>	7
2.1.3.2 <i>Características de las Fibras de Algunas Plantas No Madereras</i>	9
2.1.3.3 <i>Fibras de pajas de cereales</i>	10
2.1.4 <i>Arroz</i>	11
2.1.4.1 <i>Características generales</i>	11
2.1.4.2 <i>Características de las fibras</i>	14
<i>Lignina</i>	15
2.2 PROCESO DE PULPEO.....	16
2.2.1 <i>Pulpeo químico</i>	16
2.2.1.1 <i>Generalidades</i>	16
2.2.1.2 <i>Pulpeo con Plantas No Madereras</i>	16
<i>PROPIEDADES</i>	17
2.2.1.3 <i>Pulpas con Pajas</i>	18
2.2.2 <i>Influencia de Reactivos Químicos en Procesos de Pulpeo</i>	19
2.2.3 <i>Pulpeo Mecánico: Influencia de Niveles de Refinado</i>	21
2.3 USOS DE PULPA DE FIBRAS NO MADERERA.....	24
<i>Papel bond</i>	24
2.4 CARACTERÍSTICAS DEL PAPEL PARA CORRUGAR.....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1 LUGAR DEL ESTUDIO.....	27
3.2 MATERIA PRIMA.....	27
3.3 MATERIALES Y EQUIPOS.....	27
3.3.1 <i>Equipos</i>	27
3.3.2 <i>Materiales de laboratorio</i>	27
3.3.3 <i>Insumos</i>	28
3.4 METODOLOGÍA.....	28
3.4.1 <i>Colección y preparación de la materia prima</i>	28
Procedencia de la materia prima.....	28
Picado de la materia prima.....	28
Determinación de humedad.....	28
3.4.2 <i>Obtención de Pulpa por un Proceso de Alto rendimiento</i>	29
3.4.2.1 <i>Tratamiento químico</i>	29
3.4.2.2 <i>Obtención de pulpa</i>	29
3.4.2.3 <i>Tamizado</i>	30
3.4.2.4 <i>Control de drenabilidad</i>	30
3.4.3 <i>Refinado</i>	31
3.4.4 <i>Evaluación de la materia prima y de la pulpa</i>	31
3.4.4.1 <i>Caracterización Química de la Materia Prima</i>	31
3.4.4.2 <i>Evaluación de Fibras</i>	32
3.4.4.3 <i>Formación de papel para ensayo</i>	32
3.4.4.4 <i>Formación de cartón para ensayo</i>	33
3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	35
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	36
4.1.1 <i>Análisis químico</i>	36
4.1.2 <i>Clasificación de Fibras</i>	38

4.2 RENDIMIENTO DE LAS PULPAS DE ALTO RENDIMIENTO DE PAJA DE ARROZ.....	39
4.3 DRENABILIDAD DE LA PULPA	41
4.3.1 Drenabilidad de la pulpa en proceso con agua fría.....	41
4.3.2 Drenabilidad de la pulpa procesada con agua caliente.....	43
4.4 DENSIDAD DE LA PULPA	45
4.4.1 Densidad de la pulpa en agua fría.....	45
4.4.2 Densidad de la pulpa en agua caliente.....	47
4.5 ESPESOR.....	49
4.6.1 Espesor de hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría.....	49
4.5.2 Espesor de hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente.....	51
4.6 BLANCURA	53
4.6.1 Blancura de hoja de ensayo de pulpa en agua fría.....	53
4.6.2 Blancura de hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.....	54
4.7 OPACIDAD.....	56
4.8.1 Opacidad en la hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría.....	56
4.8.2 Opacidad en la hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente.....	57
4.8 PERMEABILIDAD GURLEY	59
4.8.1 Permeabilidad Gurley en la hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría.....	59
4.8.2 Permeabilidad en la hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente.....	61
4.10 RASGADO.....	63
4.10.1 Rasgado de hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría.....	63
4.10.2 Rasgado de hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente.....	64
4.11 TENSIÓN	66
4.11.1 Tensión en hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría.....	66
4.11.2 Tensión en hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente.....	68
4.12 REVENTAMIENTO	70
4.12.1 Reventamiento en hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría.....	70
4.12.2 Reventamiento en hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente.....	72
4.12 ENSAYOS DE RESISTENCIA DEL CARTÓN.....	73
5. CONCLUSIONES.....	77
6. RECOMENDACIONES.....	78

Lista de cuadros

Página

..... CUADRO 01: FIBRAS NO LEÑOSAS: PRODUCCIÓN MUNDIAL PARA EL 2002 (FAO 2003)	6
CUADRO 02: CONDICIONES USADAS EN LA OBTENCIÓN DE PULPAS DE RESIDUOS AGRÍCOLAS. (JIMÉNEZ 1991)	8
CUADRO 03: CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE MATERIAS FIBROSAS NO MADERERAS COMPARADAS CON MADERA. (JIMÉNEZ 1996; HANS 1998)	9
CUADRO 04: VALORES DE ANÁLISIS QUÍMICOS PARA RESIDUOS DE LA TALA DEL OLIVO Y PASTAS CELULÓSICAS OBTENIDAS DE ELLOS. (JIMÉNEZ 1990)	10
CUADRO 05: COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ALGUNAS PAJAS FUENTES DE FIBRAS PARA PAPEL. (HANS, 1998)	11
CUADRO 06: LONGITUD DE FIBRAS DE PAJA DE ARROZ EN COMPARACIÓN CON OTRAS PLANTAS ANUALES. (FAO 1962)	15
CUADRO 07: COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA PAJA Y CÁSCARA DE ARROZ. (GERBER 1992)	15
CUADRO 08: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE PAPELES DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE PULPAS CON RENDIMIENTO PROMEDIO DEL 57 %. (JIMÉNEZ 1993)	17
CUADRO 09: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE PAPELES DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE PULPAS CON RENDIMIENTOS PROMEDIO DE 47 %, REFINADAS HASTA 50-55 ^o SR. (JIMÉNEZ 1993)	18
CUADRO 10: USO DE CÁSCARA Y PAJA DE ARROZ PARA LA PRODUCCIÓN DE PULPA (GERBER-1992)	19
CUADRO 11: USO DE PULPAS DE CÁSCARA DE ARROZ (GERBER-1992)	19
CUADRO 12: CARACTERÍSTICAS FÍSICO-MECÁNICAS DE PAPELES DE PULPA SEMIQUÍMICA DE TALLOS DE ALGODÓN. (ALI 1998)	20
CUADRO 13: CALIDAD DE PAPELES DE PULPA DE PAJA DE CEREALES MEZCLADOS CON PULPA DE FIBRAS LARGAS. (HURTER 2002)	24

CUADRO 14: PROPIEDADES FÍSICAS DE CORRUGADO MEDIO PRODUCIDOS CON PULPAS DE PLANTAS NO MADERERAS. (HURTER, 2002).....	25
CUADRO 15: CARACTERÍSTICAS DEL REFINADO DE LAS PULPAS EVALUADAS.	31
CUADRO 16: PLAN EXPERIMENTAL DEL PRESENTE TRABAJO.....	35
CUADRO 17: RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS QUÍMICOS DE LA PAJA DE ARROZ (ORYZA SATIVA L.)	36
CUADRO 18: RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DE FIBRAS POR EL MÉTODO BAUER MC NETT DE PULPAS DE PAJA DE ARROZ (ORYZA SATIVA L.).....	38
CUADRO 19: CLASIFICACIÓN DE FIBRAS RETENIDAS, POR TAMAÑO DE FIBRA, SEGÚN # VUELTAS DEL REFINADO Y CARGA DE NAOH APLICADO	39
CUADRO 20: RENDIMIENTO DEL PROCESO DE PULPEO DE ALTO RENDIMIENTO DE PAJA DE ARROZ.....	40

Lista de figuras

Página

FIGURA 01: ESTRUCTURA ANATÓMICA DE LA PAJA DE ARROZ. FUENTE: COTÉ (1980).	13
FIGURA 02: SEGMENTO DE DISCO, MOSTRANDO SUS 3 SECCIONES DE DESFIBRADO...	22
FIGURA 03. DIAGRAMA DEL PROCESO DE ELABORACIÓN Y EVALUACIÓN DE PAPEL Y CARTÓN	34
FIGURA 04: VARIACIÓN DEL RENDIMIENTO DE PULPA EN FUNCIÓN DEL TIPO DE TRATAMIENTO Y EL % DE REACTIVO	41
FIGURA 05: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA DRENABILIDAD EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.	42
FIGURA 06: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA DRENABILIDAD EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	43
FIGURA 07: DRENABILIDAD MEDIDA EN GRADOS SCHOPPER (^oSR), OBTENIDOS EN PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE.	45
FIGURA 08: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA DENSIDAD EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	46
FIGURA 09: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA DENSIDAD EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	47
FIGURA 10: DENSIDAD DE PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SODA Y EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL PFI....	49
FIGURA 11: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL ESPESOR EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.	50
FIGURA 12: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL ESPESOR EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.	51

FIGURA 13: ESPESOR DE HOJAS DE PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SODA Y EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL PFI.....	52
FIGURA 14: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA BLANCURA EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	53
FIGURA 15: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA BLANCURA EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	54
FIGURA 16: BLANCURA DE HOJAS DE PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SODA Y EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL PFI.....	55
FIGURA 17: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA OPACIDAD EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	56
FIGURA 18: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA BLANCURA EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	58
FIGURA 19: OPACIDAD DE HOJAS DE PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SODA Y EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL PFI.....	59
FIGURA 20: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA PERMEABILIDAD EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	60
FIGURA 21: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA PERMEABILIDAD EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	61
FIGURA 22: PERMEABILIDAD DE HOJAS DE PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE EN FUNCIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE SODA Y EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL PFI.....	62
FIGURA 23: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL RASGADO EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	63

FIGURA 24: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL RASGADO EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.	65
FIGURA 25: VARIACIÓN DEL RASGADO DE HOJAS DE PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE EN FUNCIÓN LA CONCENTRACIÓN DE SODA Y EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL PFI.	66
FIGURA 26: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA TENSIÓN EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.	67
FIGURA 27: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA TENSIÓN EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.	68
FIGURA 28: VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE HOJAS DE PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE EN FUNCIÓN LA CONCENTRACIÓN DE SODA Y EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL PFI.....	69
FIGURA 29: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL REVENTAMIENTO EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	71
FIGURA 30: SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL REVENTAMIENTO EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE CONCENTRACIÓN DE NAOH Y NÚMERO DE VUELTAS EN EL REFINADOR PFI.....	72
FIGURA 31: VARIACIÓN DEL REVENTAMIENTO DE HOJAS DE PULPAS PROCESADAS CON AGUA FRÍA Y AGUA CALIENTE EN FUNCIÓN LA CONCENTRACIÓN DE SODA Y EL NÚMERO DE VUELTAS EN EL PFI.....	73

Lista de anexos

ANEXO 01 : Análisis estadístico de la drenabilidad de la pulpa en agua fría.

ANEXO 02 : Análisis estadístico de la drenabilidad de la pulpa en agua caliente.

ANEXO 03 : Análisis estadístico de la densidad de la hoja de ensayo de pulpa en agua fría

ANEXO 04 : Análisis estadístico de la densidad de la hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.

ANEXO 05 : Análisis estadístico del espesor de la hoja de ensayo de pulpa en agua fría.

ANEXO 06 : Análisis estadístico del espesor de la hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.

ANEXO 07 : Análisis estadístico de la blancura de la hoja de ensayo de pulpa en agua fría.

ANEXO 08 : Análisis estadístico de la blancura de la hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.

ANEXO 09 : Análisis estadístico de la opacidad de la hoja de ensayo de pulpa en agua fría.

ANEXO 10 : Análisis estadístico de la opacidad de la hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.

ANEXO 11 : Análisis estadístico de la permeabilidad de la hoja de ensayo de pulpa en agua fría.

ANEXO 12 : Análisis estadístico de la permeabilidad de la hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.

ANEXO 13 : Análisis estadístico del rasgado de la hoja de ensayo de pulpa en agua fría.

ANEXO 14 : Análisis estadístico del rasgado de la hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.

ANEXO 15 : Análisis estadístico de la tensión de la hoja de ensayo de pulpa en agua fría.

ANEXO 16 : Análisis estadístico de la tensión de la hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.

ANEXO 17 : Análisis estadístico del reventamiento de la hoja de ensayo de pulpa en agua fría.

ANEXO 18 : Análisis estadístico del reventamiento de a hoja de ensayo de pulpa en agua caliente.

ANEXO 19 : Valores Originales de ensayos.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, a nivel mundial, existe una búsqueda de nuevas alternativas tecnológicas de producción más eficientes y menos contaminantes en la industria en general. Y la industria papelera no ha podido escapar a esta tendencia. En este sentido, se han venido realizando diversos estudios sobre el mejoramiento de procesos en la producción de pulpa para papel, logrando un mejor aprovechamiento del material y un menor consumo de productos químicos, con el fin de disminuir el efecto negativo que produce el abuso de reactivos químicos en el medio ambiente. Las pulpas de alto rendimiento, representan una alternativa vigente que podría reemplazar al proceso químico de obtención de pulpa para papel, debido a que el primer proceso arroja un rendimiento por encima del 80 %, siendo esto muy ventajoso al comparar con el rendimiento de las pulpas químicas que resultan alrededor del 50 %, lo que implica la reducción de la carga de residuos como efluentes.

La industria de pulpa y papel en los países industrializados está caracterizada por el dominio de las fibras madereras, debido a que estos países poseen bosques homogéneos capaces de suministrar un material fibroso con similares características. Además cuentan con plantaciones como fuente de obtención de fibras las que sostienen la producción de pulpa para papel. Sin embargo, conforme va aumentando la población, los ingresos y la tasa de alfabetización, el consumo de papel aumenta. Según FAO (2005), sobre el consumo de papel, predice un crecimiento de alrededor del 50 % hasta el 2010. Lo que obliga a la utilización de otras fuentes de fibras no provenientes de la madera, con el fin de evitar la sobreexplotación del recurso forestal y las consecuencias ambientales que esto implica.

Dentro de las fibras no madereras aptas para la producción de pulpa para papel se encuentra la paja de arroz, la que al igual a la paja de trigo es uno de los desechos agrícolas más abundantes en el mundo. Este material procesado adecuadamente logra una pulpa con características similares a las de madera dura o latifoliada. La ventaja de la utilización de este material es su disponibilidad, el bajo costo, debido a que es considerado un desecho agrícola.

En el Perú, la disponibilidad de paja de arroz se encuentra concentrada en la zona norte del país, principalmente en los departamentos de San Martín, Amazonas, Cajamarca, Lambayeque, La Libertad y Piura, cuyas producciones de arroz, en la cosecha 2002-2003, representan el 78.4 % de la producción nacional (Ministerio de Agricultura, 2005). Lo importante de esta zona arrocerá radica en que facilita el aprovisionamiento de materia prima para la implementación de una planta papelera en la zona norte del país.

La diversidad por la que se caracteriza nuestro recurso forestal, no permite que existan áreas dedicadas al aprovechamiento de madera con fines papeleros, por lo que en el Perú sólo se produce pulpa celulósica a partir de bagazo de caña y de fibras secundarias, en tanto surge la necesidad de encontrar nuevas fuentes de fibras, determinando el proceso idóneo para la obtención de pulpa para papel, siguiendo con la tendencia reinante de utilizar tecnologías limpias y eficientes, amigables con el medio ambiente.

En el presente trabajo, se evaluó la aptitud papelera del tallo de arroz (*Oryza sativa* L.), mediante un proceso de alto rendimiento, el cual utiliza un pre-tratamiento químico, seguido del desfibrado mediante discos refinadores. Se evaluó la influencia que ejerce el incremento de la temperatura en el proceso, la concentración del reactivo y el grado de refinado. Asimismo, se propone la utilización de la pulpa de paja de arroz, para la fabricación de papel corrugado medio, para lo cual se realizaron ensayos de resistencia en una fábrica de cartones de la ciudad de Lima.

2. *REVISIÓN DE LITERATURA*

2.1 Descripción de las Fibras para papel.

Según Hale (1969), para considerar a una planta como fuente de obtención de fibras para pulpa y papel, dependerá principalmente de la forma de sus células. Las células son unidades estructurales huecas que componen las plantas, cada célula posee una pared celular que encierra una cavidad. En las fases iniciales del crecimiento de la planta las cavidades de las células contienen protoplasma, pero poco después la pared celular se forma totalmente quedando una cavidad tubular, conocida en la industria de pulpa y papel como fibra. Las paredes de estas fibras están principalmente compuestas de celulosa, en varios grados de pureza, siendo este componente la sustancia básica del papel. San Juan (1997), agrega que las fibras se caracterizan por tener una longitud mucho mayor que su diámetro, además que sus paredes celulares, densas, son las que le otorgan al papel elasticidad, flexibilidad y resistencia a la tensión requeridas.

2.1.1 *Materias Primas para obtención de fibras*

Existe una gran variedad de fibras vegetales con las cuales se puede fabricar pulpa para papel. Según Isemberg, mencionado por Libby (1974), las fibras vegetales se clasifican de la siguiente manera:

A. Fibras de frutos

- Pelos de semillas (algodón)
- Vainas
- Cáscara (coco)

B. Fibras de tallos

- Fibras de madera: gimnospermas y angiospermas
- Fibras liberianas:
 - Plantas maderables: tejido liberiano de la corteza interior de los árboles de gimnospermas y angiospermas.
 - Herbáceas dicotiledóneas: linaza, cáñamo, yute, ramio, etc.

- Haces vasculares de monocotiledóneas: Pajas de cereales, bagazo, bambú, esparto, carrizos, caña brava.

C. Fibras de hojas: abacá, sisal, phormium, piña, caroa, palma aceitera, etc.

2.1.2 Fibras madereras

Según McGinnis (1990), las paredes celulares de la planta en la madera están formadas por celulosa y hemicelulosas enlazadas mediante la lignina, un polímero aromático altamente oxigenado, con un esqueleto de fenilpropano que se repite, siendo la celulosa el componente estructural de mayor interés en las paredes celulares de las plantas. La celulosa y la lignina de las paredes celulares de la planta están estrechamente interpenetradas por una mezcla de polisacáridos denominados hemicelulosas que son sustancias insolubles en agua y difieren de la celulosa por ser ramificadas y tener un menor peso molecular.

Bublitz (1990), señala que las traqueidas (en ocasiones conocidas como fibras), pertenecientes al grupo de maderas coníferas, constituyen más del 90% del volumen de la mayoría de las maderas suaves o coníferas, y forman células principalmente utilizadas en la producción de papel. Las traqueidas tienen un largo promedio de 3 a 5 mm, la relación de su longitud a su anchura excede con frecuencia la relación de 100:1, razón por la que son tan adecuadas para la producción de buen papel.

Por otro lado, el mismo autor (Bublitz, 1990), indica que son tres los tipos de fibras presentes en las maderas duras o latifoliadas: traqueidas, fibro-traqueidas y fibras libriformes; siendo estas últimas las más importantes para la obtención de pulpa para papel. La fibra libriforme es una célula larga relativamente angosta y vacía, con paredes de gruesas a delgadas; en las fibras de pared gruesa, el lumen puede ocupar menos de la mitad del diámetro de la célula; las fibras de la madera varían desde aproximadamente 0,5 hasta 3,0 mm, siendo el promedio en longitud de 1 mm, o ligeramente mayor. Este tipo de fibras corresponde usualmente del 25 al 35 % de la composición volumétrica de las maderas duras.

Según FAO (2003), las fibras madereras son las fibras más utilizadas por la industria papelera. Estas representan más del 75 % del total mundial de las fibras que se consumen en dicha

industria; siendo los grandes productores de pulpa y papel en el mundo, Canadá, Estados Unidos y los Países Escandinavos.

2.1.3 Fibras no madereras.

Bublitz (1990), señala que, la historia del papel registra que se hizo originalmente con fibras procedentes de tejidos no leñosos o plantas no madereras, tales como corteza, algodón, lino, pastos y cañas. El avance en la tecnología de la producción química y mecánica de la pulpa desplazó su interés, promoviendo el cambio de las plantas no leñosas a los materiales de madera, a mediados del siglo XIX. En la actualidad, la mayor parte de la pulpa y el papel producidos en el mundo se obtiene a partir de la madera, lo que es evidentemente cierto, allí donde esta materia prima abunda y es relativamente barata. En muchas zonas del mundo, sin embargo, los recursos de madera son limitados; por el contrario se dispone de cantidades considerables de plantas anuales, algunas de las cuales constituyen una fuente excelente de fibras para la industria del papel.

Según FAO (2003), la definición científica de fibra no leñosa es la de un material vegetal celulósico, distinto de la madera, del que se puede extraer fibra para la fabricación de papel. La mayoría de las plantas no leñosas son anuales y alcanzan su máximo potencial fibroso en un ciclo de desarrollo vegetativo, o aún menor. Jacobs (1998), explica que existen dos tipos de fibras no madereras: unas son las que provienen de plantas que se cultivan exclusivamente para la producción de fibras, tales como, el kenaf, cáñamo, lino, entre otras. El otro tipo de fibras son las que provienen de una actividad agroindustrial, siendo la parte fibrosa un residuo aprovechable para fabricar papel. El mismo autor señala que dentro de las regiones con mayor disponibilidad de este tipo de fibras, destaca Asia, seguido de lejos por América del Sur, Europa y América Central; sin embargo, la participación de las fibras no madereras en la producción de pulpa para papel es, por lo general, muy baja. Ver cuadro 01

**CUADRO 01: Fibras no leñosas: producción mundial para el 2002
(FAO 2003)**

Región	Producción de pulpa (millones t)	Fibras no leñosas utilizadas en la producción (%)	Disponibilidad de Materia prima, fibras no leñosas (millones t)
<i>África</i>	1,84	0,10	0,25
Asia	36,49	18,76	46,9
Oceanía	2,42	0,00	0,00
Europa	36,75	0,52	1,29
Rusia	4,89	0,00	0,00
América del Norte	91,39	0,19	0,47
América Central	0,48	0,43	1,08
América del Sur	9,42	1,05	2,64
TOTAL	183,67	3,98	52,62

A inicios de la década de 1970, la asociación TAPPI estableció el Comité de Fibras No Madereras (Nonwood Plant Fibers Committe), en reconocimiento del importante crecimiento mundial en la utilización de diferentes tipos de fibras no madereras en la fabricación de pulpa para papel, cartón y paneles. Atchinson (1973), por la importancia que les corresponde, incluye dentro de las fibras no madereras aptas para pulpa para papel a las siguientes materias primas:

1. Residuos agrícolas como bagazo de caña de azúcar, pajas de cereales, paja de sorgo y paja de arroz.
2. Plantas de crecimiento natural como bambú, cañas, papiro y esparto.

3. Plantas no madereras cultivadas especialmente por su tipo y contenido de fibras, de donde se identifica a:
 - a. Fibra de tallos, incluido yute, cáñamo, kenaf, etc.
 - b. Fibra de hojas como abaca (cáñamo de manila), sisal, henequén.
 - c. Fibra de algodón, linter de algodón y trapos de algodón.

2.1.3.1 Fibras de residuos agrícolas: Generalidades

Gonzáles (2001), indica que en el Perú los residuos agrícolas más importantes son:

- bagazo de la caña de azúcar, única materia prima empleada en la industria de pulpa
- tallo o paja de arroz
- tallo del maíz, destinado para su aprovechamiento como alimento para ganado (chala).
- tallo del marigold y t. del espárrago, aunque estas materias primas se queman para facilitar su reincorporación al suelo, o son materia prima para la elaboración de tierra vegetal (compost).

Jiménez (1991), publicó varios artículos en los que estudió las aptitudes papeleras de residuos agrícolas tales como, tallos de girasol, podas de olivo y retoños de vid, incluyendo a las hojas de palma aceitera y tallos de espárragos. El mismo autor (Jiménez, 1991) menciona, la importancia de la caracterización de las materias primas no madereras para obtener pastas celulósicas, dado que esta información puede orientar el proceso de pulpeo químico más idóneo a seguir y el tipo de pasta a conseguir; por ejemplo, si la materia prima presenta un alto contenido de lignina, la concentración de soda será mayor, o si la materia prima estudiada presenta un alto porcentaje de solubles en agua fría o caliente, influirá en el tiempo y temperatura de cocción y, finalmente en el rendimiento del proceso. En el cuadro N° 02 se observan las diferentes condiciones de pulpeo a la que se pueden someter a algunos residuos agrícolas.

CUADRO 02: Condiciones usadas en la obtención de pulpas de residuos agrícolas. (Jiménez 1991)

Residuo Agrícola	T (°C)	NaOH (%)	L:M	Drenabilidad °SR	R %
Podas de olivo(madera)	147,1	20,53	4:1	20	47,02
Podas de olivo (ramas)	144,4	15,26	6:1	50	29,56
Paja de trigo	147,1	11,80	6:1	31	53,16
Tallos de girasol	147,1	11,85	6:1	79	54,94
Ramas de vid	141,9	13,87	6:1	13	38,19
Tallos de algodonera	145,8	16,41	4,5:1	40	54,29

T: temperatura; R% rendimiento de pulpeo; L:M relación licor-materia seca

Jeyasingam (1998), reconoce a los residuos agrícolas como fuente de fibras para pulpa y que jugarán un rol importante, en el futuro, principalmente en los países altamente poblados como China, India, Egipto y algunos países de África y Latino América, donde estas plantas anuales crecen primero para el consumo humano y luego sus residuos se pueden aprovechar para la fabricación de pulpa para papel. Por otro lado, el mismo autor afirma que, las limitaciones para el proceso de pulpeo de las fibras no madereras a tener en cuenta son el alto contenido de cenizas, lento drenaje, y tener fibras cortas comparadas con las de madera. Pero, estos inconvenientes se pueden superar si se diseñan fábricas de papel especiales para las características de dichas fibras, además recomienda mezclar pulpas de fibras no madereras con pulpa de fibras largas de madera para cumplir con los requerimientos de calidad de los papeles de hoy en día.

Según Jiménez (1996), en cuanto al almacenamiento de residuos agrícolas, el factor más importante a tomar en cuenta es la humedad residual; dado que para estos materiales no es necesaria una conservación demasiado rigurosa por no estar destinados a la alimentación; la paja de trigo, los sarmientos de vid y los tallos de algodonera se conservan bien en ambientes con humedades relativas inferiores a 60-70%, mientras que otros residuos necesitan valores menores.

2.1.3.2 Características de las Fibras de Algunas Plantas No Madereras

Correia (1998), estudió a las fibras del cáñamo, utilizada en la industria papelera, dividiendo a la planta en dos partes: fibras del floema y centro. El estudio dio como resultado que las fibras obtenidas del floema son de mejor calidad papelera que las del centro del tallo, ya que tiene una alta densidad estructural debido a la mayor presencia de material celulósico en sus paredes celulares. Además, el cáñamo posee fibras extremadamente largas que miden en promedio 25 mm; también observó un bajo contenido de lignina (11 %), y alto contenido de celulosa 64 %; y un bajo contenido de lignina residual en el proceso de pulpeo.

Las características químicas de otras plantas no madereras son mostradas en el cuadro N° 3.

CUADRO 03: Características químicas de materias fibrosas no madereras comparadas con madera. (Jiménez 1996; Hans 1998)

		Celulosa %	Lignina %	Pentosanos %	Cenizas %	Sílice %
PAJA DE ARROZ		42-46	12-15	24-30	15-20	10-18
Paja de trigo		50-52	16-20	26-30	5-10	4-8
Bagazo	Entero	53-56	19-24	27-32	2-5	2-4
	Desmedulado	56-62	19-22	31-32	2-3	1-2
BAMBÚ		7-65	24-27	17-18	3-4	1-2
Caña		52-60	16-23	17-24	4-5	2-3
Kenaf	Entero	54-56	13-15	18-20	4-5	2-3
	Floema	2-44	7-8	16-17	5-6	2-3
	Médula	33-34	17-18	19-20	3-4	1-3
CONÍFERAS		40-45	26-34	7-14	<1	--
<i>Latifoliadas</i>		38-49	24-30	19-26	<1	--

Jiménez (1990), caracterizó a los residuos de la tala de olivo, así como las pastas celulósicas obtenidas de ellos; clasificó a los residuos en madera (troncos con diámetro superior a 5 cm.) y ramones (troncos pequeños, baretas y hoja). En el estudio, al comparar las pastas obtenidas, se observa que la de madera de olivo tiene menores valores de solubilidad en soda al 1 %, % cenizas, extraíbles en alcohol-benceno y de holocelulosa que los de Ramones, pero mayor contenido de α -celulosa y lignina. Las características químicas del tallo de olivo y de sus pulpas son mostradas en el cuadro N° 4.

Cuadro 04: Valores de análisis químicos para residuos de la tala del olivo y pastas celulósicas obtenidas de ellos. (Jiménez 1990)

Parámetros %	Residuos tala de olivo		Pulpas celulósicas	
	Madera	Ramas	Madera	Ramas
SAF	15,50	12,90	1,52	0,34
SAC	17,26	18,07	1,34	2,43
SS1	30,04	40,98	2,56	10,55
EAB	12,24	12,79	0,70	5,19
Cenizas	1,38	3,41	1,75	5,03
Holocelulosa	69,14	63,49	71,48	76,33
Lignina	17,55	19,02	23,04	21,89
αCelulosa	41,09	38,58	53,33	49,97
Pentosanos	20,48	18,60	22,03	21,59

Solubles en agua fría (SAF), caliente (SAC), soda al 1% (SS1) y alcohol-benceno (EAB), contenido de cenizas (C), holocelulosa (H), lignina (L), α -celulosa (α C) y pentosanos (P).

2.1.3.3 Fibras de pajas de cereales

Según Bublitz (1990), muchas de las pajas de cereales se convierten en pulpa y se blanquean con facilidad, ya que no están fuertemente lignificadas, a esto se debe los breves periodos de tiempo que demanda el proceso de pulpeo de este tipo de material. Además la mayoría de las pulpas de paja requieren poca refinación antes de producir el papel, por lo que resultan muy adecuadas para aquellos papeles en que no se requiere elevada resistencia. 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 materias primas ideales para papel corrugado de alta calidad.

Hans (1998) identifica al grupo de residuos agrícolas dentro de las fibras de producción, son las que producen fibras luego de ser aprovechadas, diferentes a aquellas que se cultivan exclusivamente por sus fibras (cáñamo, yute). Dentro de los residuos agrícolas se encuentran ubicados el bagazo de caña, tallos de maíz y las pajas de cereales; a continuación, en el cuadro 05, se presentan las características químicas de cuatro pajas.

CUADRO 05: Composición química de algunas pajas fuentes de fibras para papel. (Hans, 1998)

PAJA	Composición Química (%)				
	Celulosa	Lignina	Pentosanos	Cenizas	Sílice
Arroz	28 – 48	12 – 16	23 – 28	15 - 20	9 – 14
Trigo	29 – 51	16 – 21	26 – 32	4.5 - 9	3 – 7
Cebada	31 – 45	14 – 15	24 – 29	5 - 7	3 – 6
Avena	31 – 48	14 – 19	27 – 30	2 - 5	0.5 – 4

Jacobs (1998), señala que en el caso de la paja de trigo las características físicas de sus fibras dependen de las condiciones del suelo y riego al que han sido sometidos los cultivos de este cereal. El citado autor caracterizó a ocho tipos de pajas de trigo cultivados en el Estado de Washington en los Estados Unidos, teniendo como resultado que la longitud promedio de las fibras de pulpa de paja de trigo se encuentran en un rango de 0,8 a 1,2 mm. Estos valores, según literatura, son similares a los de pulpas de maderas latifoliadas por lo que las pulpas de paja de trigo pueden sustituir a las pulpas de maderas latifoliadas.

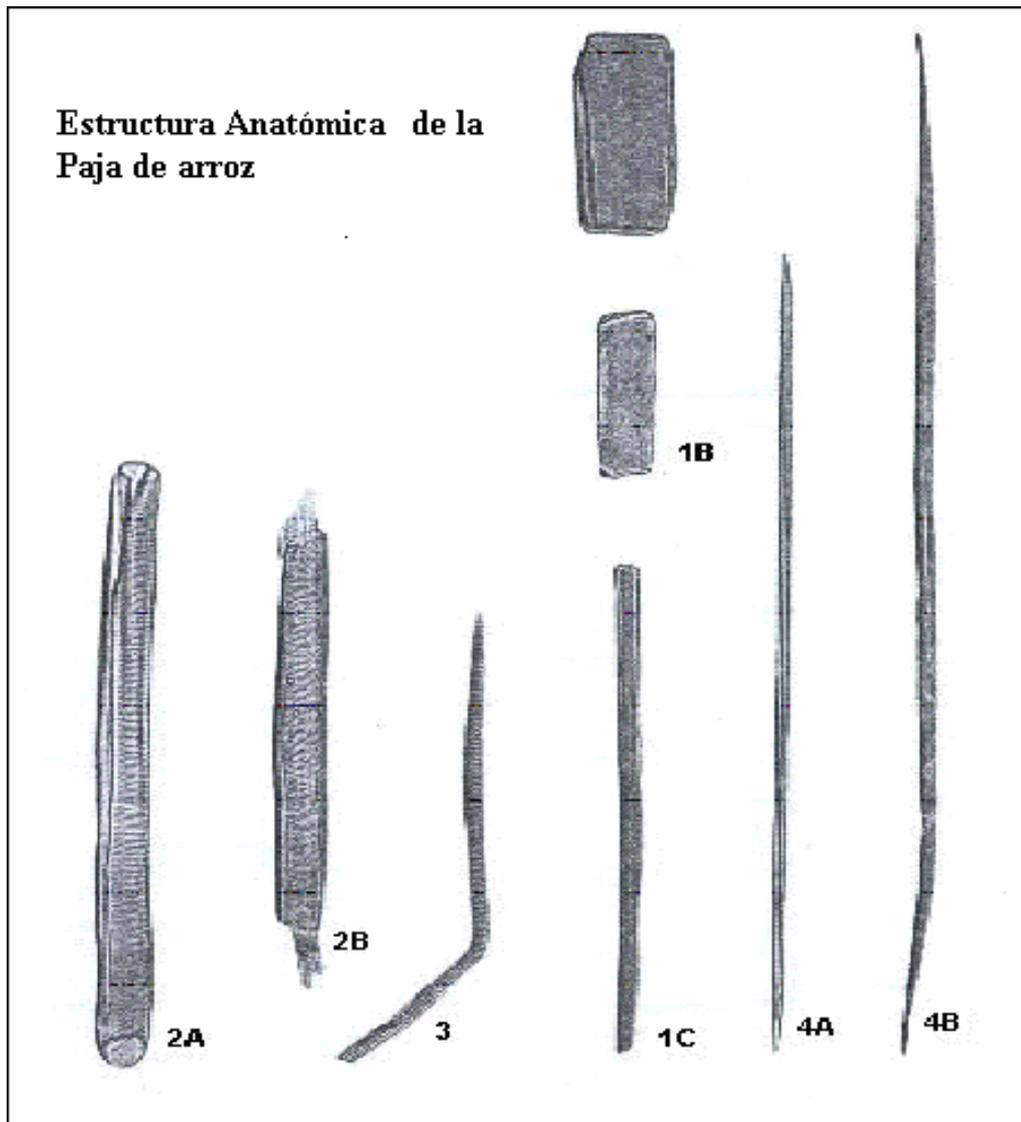
2.1.4 Arroz

2.1.4.1 Características generales

Descripción Botánica de la especie:

Clase	:	Monocotiledónea
Orden	:	Glumiflorales
Familia	:	<i>Gramineae</i>
Sub familia	:	<i>Poaceae</i>
Tribu	:	<i>Oryzae</i>
Género	:	<i>Oryza</i>
Especie	:	<i>Oryza sativa</i> L.
Fuente	:	Tinarelli (1989)

Tinarelli (1989), menciona que el arroz es el cereal más cultivado en el mundo después del trigo; el arroz constituye la base de la alimentación de los pueblos del Sudeste Asiático, de la India y del Japón. Todas las formas cultivadas de arroz pertenecen a las especies: *Oriza sativa* y *Oriza glaberrima*, siendo el centro de diferenciación originario, para la primera de las dos especies, el Sudeste asiático (la India o la península de Indochina). Por lo que respecta a *Oryza glaberrima*, cultivada casi exclusivamente en África, parece ser originaria de Nigeria. El mismo autor señala que las plantas del género *Oryza* están conformadas por tallos rectos dispuestos en manojos o macollas, con raíz fibrosa, cilíndrica, fasciculada; provista de 7-11 hojas durante la fase vegetativa que alcanzan una altura variable entre los 80 y 150 cm., según la variedad y condiciones del cultivo. Los tallos están formados por entrenudos de diferente longitud, limitados por nudos donde se inserta una vaina foliar que envuelve el entrenudo inmediato superior; la inflorescencia es una panícula más o menos compacta de 10-25 cm. de longitud, donde cada flor es una espiguilla unifloral con seis estambres y dos estigmas plumosos. A continuación en la figura N° 01 se aprecia Los Componentes anatómicos de la estructura de la paja de arroz.



Leyenda: 1A, 1B y 1C: Células de Parénquima (185x); 2A y 2B: Vasos (185x); 3: Traqueida (185x); 4A y 4B: Fibras (185x y 15x).

FIGURA 01: Estructura anatómica de la paja de arroz. Fuente: Coté (1980)

Chandler (1984), señala que en todos los continentes se produce arroz, sembrándose desde el Ecuador hasta 53° latitud norte y 40° latitud sur; y en regiones tropicales se puede cultivar hasta alturas de 2400 m.s.n.m. El Ministerio de Agricultura (2004), agrega que China es el mayor productor de arroz con 32 % del volumen total seguido de la India e Indonesia con el 22 % y 9 % de la producción respectivamente. En el Perú las principales zonas arroceras del país son Lambayeque, La Libertad y San Martín representando el 52% de la producción nacional.

2.1.4.2 Características de las fibras

Xiangju (1983), señala que en general las pajas de cereales poseen fibras cortas; el promedio de longitud y ancho de fibra de paja de arroz son de 1 mm y 9 μm respectivamente, el espesor de sus paredes celulares promedio es de 3,3 μm . Asimismo, señala que la paja de arroz contiene una elevada cantidad de células de parénquima, que no son de valor para la fabricación de papel.

Según Sociedad Paramonga (1975), la paja de arroz presenta una composición química y anatómica variada debido a la diversidad de los elementos que conforman el tallo: se encuentran nudos densos, células epidérmicas y parénquima de las hojas lo que hace aumentar enormemente el contenido de cenizas. Por lo general, la paja de arroz es un material fácil de convertir a pulpa, mediante procesos químicos y semiquímicos, debido a la estructura abierta de la planta y bajo contenido de lignina; este componente es muy reactivo, y se ubica en las capas externas de la fibra, requiriendo reacciones de superficie para su solubilización, siendo la cinética de pulpeo dependiente mayormente de la difusión del reactivo.

FAO (1962), señala que dentro de las pajas de cereales y otras plantas anuales comúnmente usadas en la obtención de pulpas celulósicas, la paja de arroz destaca por presentar un alto porcentaje de sílice, que representaría un inconveniente en la etapa de recuperación de reactivos en los procesos químicos. Sin embargo, el bajo contenido de lignina de la paja de arroz representa una ventaja que facilitaría el proceso de pulpeo. Por otro lado, en cuanto a las características físicas, la paja de arroz contiene un alto porcentaje de fibras de hoja las cuales tienen un bajo valor en la fabricación de papel. Si bien las fibras de paja de arroz se consideran cortas para la fabricación de pulpas, estas se encuentran dentro del promedio de otras plantas anuales utilizadas para dicho fin. (Ver cuadro 06). Se observa que la paja de arroz presenta valores máximos, más altos que los de otras pajas de gramíneas, aunque en valor promedio, la fibra de bagazo de caña es mayor en longitud.

CUADRO 06: Longitud de fibras de paja de arroz en comparación con otras plantas anuales. (FAO 1962)

Dimensiones de Fibra		Arroz	Trigo	Bagazo	Maíz	Esparto
Longitud (mm)	Máximo	3,5	3,1	2,8	2,9	1,6
	Mínimo	0,7	0,7	0,8	0,5	0,6
	Promedio	1,5	1,5	1,7	1,5	1,1
Diámetro (µm)	Máximo	13,6	24	34	24	13,6
	Mínimo	5,1	6,8	10,2	13,7	6,8
	Promedio	8,5	13,3	20	18	9,2

Gerber (1992), analizó a las fibras de paja y cáscara de arroz con el fin de obtener pulpas celulósicas de ellas, donde encontró que los valores de celulosa para ambos materiales son similares, 34,59 % y 35,56 % para paja de arroz y cáscara de arroz respectivamente; por otro lado el contenido de lignina en la paja de arroz es inferior al de la cáscara de arroz, como se muestra en el cuadro 07.

CUADRO 07: Composición y características de la paja y cáscara de arroz. (Gerber 1992)

Parámetros	Materia prima	
	Paja de arroz (%)	Cáscara de arroz (%)
<i>Lignina</i>	6,21	13,27
Celulosa	34,59	35,56
Hemicelulosa	18,7	13,1
Pentosanos	18,2	15,3
Cenizas	15,9	19,0
Sílice	13,39	19,37

2.2 Proceso de pulpeo

Según McGovern (1990), la pulpa se obtiene por la separación de las fibras de la madera u otros materiales fibrosos, y es casi siempre 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 pulpa los integrantes químicos originales del material fibroso quedan inalterados, excepto por la eliminación de los solubles en agua, por otro lado 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 la celulosa. El mismo autor, señala que las propiedades de los productos terminales, papeles y cartones, dependerán de las características de las pulpas utilizadas en su manufactura las que a su vez variarán con las especies de fibras de distintas maderas o de plantas no leñosas utilizadas, así como del proceso empleado en la obtención de pulpa.

2.2.1 Pulpeo químico

2.2.1.1 Generalidades

Según Bryce (1990), los dos principales procesos alcalinos que se utilizan en la producción de pulpa son los procesos a la soda y al sulfato (conocido como proceso Kraft). En ambos, el principal producto químico para la cocción es el hidróxido de sodio. En los procesos químicos de producción de pulpa, las fibras se separan entre sí, por la eliminación, en cuanto sea posible de la lignina de la lámina media.

2.2.1.2 Pulpeo con Plantas No Madereras

Sanjuán (1997), señala que en el caso de las fibras no madereras, se emplea normalmente el proceso a la soda. Debido a que las plantas no maderables se impregnan con facilidad y tienen un contenido bajo de lignina reactiva, la cantidad de reactivos que se necesita es menor que en el pulpeo de madera. Para el proceso a la soda se requiere de 10 a 15 % de NaOH, referido al material fibroso base seca, y una temperatura de 160 a 170° C. El rendimiento es de 40 a 55 % y depende en gran medida del tipo y calidad de la materia prima, especialmente del contenido de lignina y e la proporción de células de parénquima. Un contenido muy alto de parénquima

no sólo afecta el rendimiento, sino también aumenta el consumo de álcali, disminuye la resistencia de la pulpa y aumenta el contenido de finos, con lo que baja drásticamente la drenabilidad.

Jiménez (1993) obtuvo pulpa celulósica de residuos agrícolas tales como podas de olivo, paja de trigo, tallos de girasol, retoños de vid y tallos de algodón; las pulpas obtenidas a la soda arrojaron rendimientos de 47 % y 57 %, resaltando que el mayor rendimiento (57 %) se obtuvo al utilizar menor concentración de NaOH, con respecto a la usada en las pulpas de menor rendimiento. Dentro de los residuos agrícolas utilizados en el experimento, el autor concluye que la paja de trigo y los tallos de algodón son los residuos agrícolas más apropiados para la fabricación de papel, mientras que los retoños de vid son los menos apropiados para dicho propósito; los resultados de esta investigación son presentados en los cuadros 08 y 09.

Escolano (1979), estudió la posibilidad de fabricar papel periódico mezclando pulpas de fibras no madereras, tales como bagazo de caña de azúcar, fibras de hojas de plátano y paja de arroz; donde la mezcla compuesta por un 80 % de pulpa de paja de arroz (a la soda fría) y el 20% de hojas de plátano (pulpa química). La mezcla de ambas pulpas blanqueadas, fue la que mejores resultados obtuvieron superando los requerimientos mínimos de para papel periódico según estándares FAO; además se observó que disminuyendo a 15 % la pulpa de hojas de plátano y aumentando a 85 % la pulpa de paja de arroz, mejoró las propiedades de este tipo de papel.

CUADRO 08: Características físico-mecánicas de papeles de residuos agrícolas de pulpas con rendimiento promedio del 57 %. (Jiménez 1993)

<i>PROPIEDADES</i>	Podas de olivo	Paja de trigo	Tallo de girasol	Retoño de vid	Tallo de algodón
Gramaje (g/m ²)	62	62	65	87	68
Longitud de rotura (m)	508	8191	4434	790	3971
Estiramiento (%)	0.67	2.08	1.46	0.50	1.70
Índice de reventamiento (kN/g)	0.18	3.46	1.47	0.24	1.34
Índice de rasgado (mN.m ² /g)	1.21	3.99	4.09	1.46	4.90
Blancura (%)	22.37	30.05	25.77	16.92	24.47

Cuadro 09: Características físico-mecánicas de papeles de residuos agrícolas de pulpas con rendimientos promedio de 47 %, refinadas hasta 50-55°SR. (Jiménez 1993)

PROPIEDADES	Podas de olivo	Paja de trigo	Tallo de girasol	Retoño de vid	Tallo de algodón
Gramaje (g/m ²)	67	64	65	65	64
Longitud de rotura (m)	5337	11715	6335	2809	8928
Estiramiento (%)	2.2	2.9	1.6	1.7	3.0
Índice de reventamiento (kN/g)	2.20	5.36	2.25	0.88	3.78
Índice de rasgado (mN.m ² /g)	3.75	3.50	6.39	2.15	5.77
Blancura (%)	21.33	28.33	26.83	16.32	23.90

2.2.1.3 Pulpas con Pajas

Terziotti (1975), señala que uno de los procesos de pulpeo para pajas es la previa maceración de las mismas en un pozo alternando capas de paja y cal por varias semanas a presión atmosférica y a la temperatura del cuarto. Otro método es el proceso mecano- químico por Aronowsky, en el cual se usa un Hidrapulper, vapor y soda cáustica, la digestión se efectúa hasta llegar al punto de ebullición, a una consistencia de 10-12 % por 90 minutos, obteniéndose así pulpas con un rendimiento de 65-70%.

El mismo autor (Terziotti, 1975), agrega que las pulpas de pajas procesadas con cal son usualmente empleadas en la fabricación de paneles duros; las pulpas mecano-químicas, usando NaOH como reactivo se emplean en la producción de papel para corrugar. El autor afirma que las pulpas químicas de pajas encuentran una gran variedad de aplicaciones, ya sean blanqueadas o semi-blanqueadas. Estas pulpas se pueden utilizar para papeles de envoltura, bolsas de cemento, papeles finos, etc. El autor concluye que las propiedades físicas de la pulpa de pajas, especialmente las pulpas químicas, son tan buenas por sus propiedades mostradas, comparando con las mejores pulpas de maderas latifoliadas.

Gerber (1992) realizó un estudio de obtención de pulpa de paja de arroz con 4 variedades de arroz llegando a la conclusión de que no existen diferencias entre ellas, de acuerdo a los parámetros analizados. La cáscara de arroz también representa un componente importante de la planta: por cada 100 kg de arroz se puede obtener 22 kg de cáscara. El mismo autor estudió la cáscara de arroz en procesos de pulpeo, obteniendo resultados mostrados en el cuadro 10; recomendaciones del uso de la cáscara de arroz para papeles, se muestran en el cuadro 11.

CUADRO 10: Uso de Cáscara y Paja de Arroz para la Producción de Pulpa (Gerber-1992)

CARACTERÍSTICAS DE PULPAS		Cáscara de arroz	Paja de arroz
Rasgado	(mN-m²/g)	4,2	9,9
Tensión	(km)	2,7	5,6
CMT	(lb)	59	85
RCT	(lb)	30	80

CUADRO 11: Uso de Pulpas de Cáscara de Arroz (Gerber-1992)

Tipo de papel	% en uso	Fibra complementaria
Duplex y triples	20 - 60	pulpa madera
Corrugado	30 - 80	Reciclado
Corrugado	30 - 90	Pulpa de paja
Envolturas	80 - 100	Reciclado
Cartón	20 - 70	reciclado o kraft

2.2.2 Influencia de Reactivos Químicos en Procesos de Pulpeo

Kurdin (1990) señala que uno de los procesos semiquímicos para la obtención de pulpa, es el proceso a la soda fría: el proceso implica el remojo de las astillas, en una solución de hidróxido de sodio a baja temperatura y presión atmosférica, 30 a 120 minutos antes de proceder a desfibrar. El NaOH provoca una hinchazón de las hemicelulosas y debilita la pared celular,

tanto dentro de la lamela intermedia como dentro de la pared secundaria, ayudando así en la fibrilación de las capas S₁ y S₂.

En procesos semiquímicos, con relación a la cantidad de reactivo, el mismo autor (Kuridin, 1990) agrega que cuanto mayor es la cantidad de álcali absorbido, es menor la energía de desfibrado requerida para llevar la pulpa a una resistencia elevada; por consiguiente, la pulpa tendrá un promedio de longitud de fibra mayor y, por tanto, menos finos.

Ali (1998), obtuvo pulpas de tallos de algodón con tres diferentes tratamientos, uno de los cuales fue a la soda fría con posterior refinado. La pulpa obtenida bajo las condiciones de este proceso resulta con valores altos de opacidad, debido en parte por la gran cantidad de lignina dejada en la pared celular. Por otro lado, el autor remarca que, la concentración del álcali influye en los valores de rasgado, disminuyendo sus valores mientras se va aumentando la concentración de NaOH. (Ver cuadro 12).

CUADRO 12: Características físico-mecánicas de papeles de pulpa semiquímica de tallos de algodón. (Ali 1998)

Concentración NaOH (g/l)	Tiempo de refinado (min)	Gramaje (g/m ²)	Longitud de rotura (km)	Índice de reventamiento (kPa*m ² /g)	Índice de rasgado (mN*m ² /g)	Blancura (%)	Opacidad (%)
40	25	65,0	3,44	1,58	11,0	38,3	93,3
	40	65,9	3,93	1,88	10,1	38,4	93,2
	75	63,8	5,91	3,03	5,19	39,3	93,0
80	25	63,3	3,64	1,47	10,6	38,8	93,1
	39	64,1	4,40	3,88	10,3	39,2	93,4
	75	60,5	4,39	2,45	10,2	39,4	93,1
120	25	65,5	3,76	1,49	5,10	37,4	94,8
	45	64,6	4,08	1,90	5,76	37,5	94,7
	80	63,4	5,16	2,47	5,37	39,1	94,2
160	15	63,8	3,06	1,15	4,55	37,1	94,8
	30	62,2	3,68	1,45	4,56	37,2	94,4
	60	61,1	4,37	1,99	6,80	38,7	94,1

2.2.3 Pulpeo Mecánico: Influencia de Niveles de Refinado

Sanjuán (1997) indica que en la producción de pulpa con refinadores, se requiere generalmente de dos etapas:

- ◆ la primera etapa llamada **desfibrado**, que convierte la estructura original de la materia prima en fibras simples;
- ◆ en la segunda etapa denominada **fibrilación**, se reduce una parte de las fibras a fragmentos de pared celular.

Asimismo, el mismo autor afirma que el objetivo de la primera etapa es producir fibras simples y largas con un mínimo de desperdicio; y que en la segunda etapa ocurre la conversión de una parte de las fibras enteras en fibrillas y fragmentos de pared celular, lo que suministra las características de unión requeridas por el papel.

Kurdin (1990), asevera que el diseño de la placa refinadora de disco es muy importante. En general, son tres las secciones del disco: sección de **barra rompedora**, sección de barra **refinadora intermedia** y sección de **barra fina**. La sección de barra rompedora del disco cuenta con barras anchas con surcos profundos, y sirve para romper las astillas. La sección del disco de la barra refinadora cuenta con barras angostas y ranuras de poco fondo. Las barras están paralelas entre sí y dispuestas en secciones alimentadas mediante ranuras de entrada. La acción de la barra rompedora es sumamente importante para producir pulpa de alta calidad; ver figura N° 02.

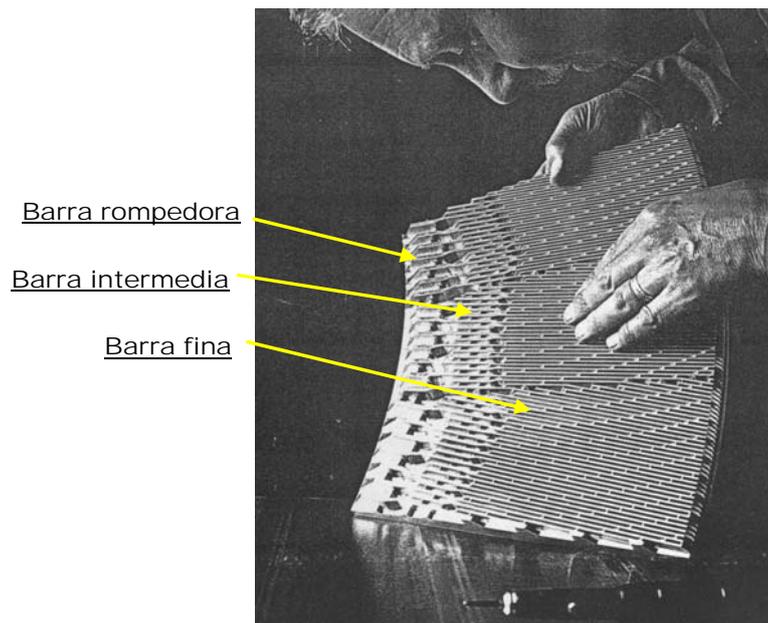


FIGURA 02: Segmento de Disco, mostrando sus 3 Secciones de Desfibrado¹

Según de Choudens (1984), la primera etapa del desfibrado mecánico, que permite la separación de las fibras, se efectúa en un desfibrador de discos de gran potencia con alta velocidad de rotación de discos. Las fuerzas a las cuales están sometidas las astillas dentro del desfibrador son principalmente una combinación de fuerzas de compresión y cizallamiento. El mismo autor agrega que una de las principales ventajas de este tipo de pulpas es el alto rendimiento que arroja el proceso de pulpeo; por otro lado, un inconveniente importante es su elevado consumo de energía durante el proceso.

Robinson (1991), considera que en la segunda etapa el refinado es un proceso mecánico que rompe los enlaces de hidrógeno dentro de la pared celular aumentando así, la flexibilidad de la fibra o fibrilado y la separación de los finos de las fibras; de ésta manera se obtiene un material celulósico con mayor movilidad y capacidad de formar nuevos enlaces de hidrógeno. Asimismo, el refinado aumenta consistentemente las propiedades de resistencia a la tensión y al rasgado a medida de que aumente el refinado.

¹ Sunds Defibrador (2000). Mechanical Pulps. Sunds Defibrador, Suecia

Zhao (1992), sostiene que las pulpas de paja tienen mayor contenido de hemicelulosas que las de madera, por lo que estas pulpas hidratan más fácilmente y responde más rápido a la refinación. En cuanto al refinado PFI, el autor menciona que 1500 vueltas son suficientes para disolver los agregados de parénquima y células epidérmicas. Además que el contenido de finos aumenta considerablemente de una pulpa de 1500 vueltas comparándola con una pulpa sin refinar. Por otro lado, si se aumenta la refinación de 1500 a 3000 vueltas, el incremento de los finos es insignificante.

Según Atchinson (1973), la mayoría de pulpas no provenientes de la madera son de fibras cortas y no necesitan ser cortadas en la operación de refinado, pero si requieren aumentar la fibrilación y las propiedades de unión entre fibras. El refinado de alta consistencia, afirma el autor, es bueno para desarrollar propiedades de resistencia adecuadas para la fabricación del papel, mientras que en el refinado de baja consistencia se cortan las fibras. Misra (1990), agrega que las pulpas de plantas no leñosas, necesitan un refinado relativamente más suave en comparación con las pulpas de madera de fibra larga.

Young (1991), sostiene que la refinación de pulpas mecánicas no produce los mismos efectos que cuando se refina pulpas químicas, debido a que estas últimas son de celulosa relativamente pura, con los grupos hidroxílicos accesibles. En el caso de las pulpas mecánicas, los grupos hidroxílicos presentes en la pared celular de la fibra separada aparecen bloqueados por la lignina, así que la refinación en pulpas mecánicas es un tratamiento físico para completar el proceso de desintegración.

Garceau (1979), agrega que el refinado en pulpas mecánicas deshace los paquetes de fibras o "*shives*" (responsables de la aparición de zonas voluminosas durante la formación de las hojas) además de mejorar la superficie rugosa ocasionada por los *shives*. Por otro lado, el mismo autor añade que la temperatura durante el desfibrado produce un efecto de ablandamiento de la lignina, permitiendo así, que las astillas se hagan menos quebradizas, facilitando la separación de las fibras, a una temperatura mayor a 135° C, que es el punto donde la lignina pasa de un estado vítreo a un estado elástico.

2.3 Usos de pulpa de fibras no maderera

Fernández (2000), señala que el uso de fibras anuales, como la paja de arroz, es óptimo para la producción de cartón para corrugar debido a la elevada rigidez de sus fibras, así como también son excelentes para la producción de papel para cigarrillo debido a su elevado contenido de cenizas, utilizándose también en la producción de papel de impresión.

Hurter (2002), afirma que de las fibras no madereras comúnmente usadas en la industria de pulpa y papel, las pajas de cereales son de mayor disponibilidad y las más usadas en el mundo en ésta industria. Por lo general, a las pulpas de fibras no madereras se les adiciona pulpas químicas de fibras largas (madera de coníferas), ya sean procesadas al sulfito o kraft, con la finalidad de proporcionar las propiedades de resistencia requeridas para el papel. Aunque, agrega el autor, si bien las pulpas de fibras no madereras pueden ser usadas en un 100 % para la fabricación de papel, las mezclas de pulpas de plantas anuales con pulpas de madera, en diferentes porcentajes, se llevan a cabo con el fin de ajustar las propiedades del papel, según los requerimientos del mercado. En el cuadro 13 se observa algunos usos para la pulpa de paja de cereales en las industrias papeleras.

CUADRO 13: Calidad de papeles de pulpa de paja de cereales mezclados con pulpa de fibras largas. (Hurter 2002)

Tipo de papel	Paja (%)	Pulpa de fibra larga (%)	Calidad
<i>Papel bond</i>	75-85	15-25	Muy bueno
Papel de bajo gramaje	50-60	40-50	Bueno
Corrugado medio	90	10	Excelente
Paneles de paja	100	0	Bueno
Papel de cera	50-60	40-50	Bueno

Según Hurter (2002), algunas de las propiedades físicas de los corrugado medio hechos de pulpa de plantas no madereras, son comparables con los que fueron hechos con 100 % de pulpa semiquímica de madera, tal como se puede ver en el cuadro 14.

Cuadro 14: Propiedades físicas de corrugado medio producidos con pulpas de plantas no madereras. (Hurter, 2002)

Fuente	Gramaje (gr/m ²)	Espesor (µm)	Cobb (gr/m ²)	CMT (lb)	Ring Crush (lb)
85 % bagazo, 15 % papel reciclado	115	--	--	60	38
45 % bagazo, 55 % papel reciclado	127	275	307	63	40
100 % paja de trigo	90	--	--	48	28
100 % paja de trigo	115	--	--	59	36
100 % paja de trigo	125	--	--	65	42
100 % paja de trigo	127	--	--	72	45
50% paja de trigo, 50 % p.reciclado	144	--	--	70	39
70% paja de arroz, 30% p.reciclado	122	235	38	32	26
100 % pupa semiquímica de madera	127	215	--	73	37
100 % papel reciclado	115	240	--	42	40

Smook (1982) indica que generalmente las pulpas semiquímicas son las ideales para el corrugado medio porque proveen una buena resistencia al aplastamiento y elevada dureza. El autor define al papel liner como un cartón ligero, usado comúnmente como la capa externa en la conformación de cajas corrugadas y como papel de envoltura; el gramaje medio es de 205 g/m² y otros grados cubren el rango de 110 a 439 gr/m²; los requerimientos primarios del liner son una alta rigidez y resistencia al reventamiento. Además señala, que el cartón corrugado y el liner se elaboran principalmente a partir de pulpa semiquímica y fibra reciclada (75 y 25% respectivamente); asimismo menciona con respecto al corrugado medio que la hoja presenta una gran habilidad para resistir los esfuerzos y deformaciones de la operación del corrugado sin la fractura o ruptura de las ondas.

2.4 Características del papel para corrugar.

ACCCSA (2004), afirma que en la pulpa para la fabricación del corrugado medio la lignina no se remueve totalmente. Esto ayudará a formar un papel que será rígido una vez sea ondulado, por lo que el método utilizado para la fabricación de la pulpa es el semiquímico. Por otro lado,

el mismo autor indica que, generalmente se usan fibras de madera dura, para fabricar el corrugado medio, debido a que contribuye a darle mayor resistencia al aplastamiento horizontal una vez sido ondulado. Las fibras largas le dan resistencia al papel pero, en el corrugado medio hay que sacrificar un poco la resistencia del papel para darle mayor rigidez una vez este haya sido corrugado. Los gramajes de papel corrugado que usualmente se fabrica, están en el rango de 126 a 190 gr/m².

El mismo autor (ACCCSA, 2004), menciona que dentro de las principales propiedades mecánicas del papel para corrugar se encuentran la resistencia CMT (Concora Medium Test) y la resistencia a la compresión sobre el canto del papel RCT (Ring Crush Test); las cuales se definen a continuación.

- **Resistencia CMT:** para la realización de esta prueba se sigue la norma Tappi-T809 om-93. Esta prueba se define como la resistencia al aplastamiento en plano de las ondas del corrugado medio, para lo cual, es necesario ondular una muestra de corrugado en un equipo llamado Concora Medium Flutter, la que está operada a temperatura, presión y velocidad controlada, para luego proceder al aplastamiento de las ondas en una máquina de compresión. Hay que anotar que la muestra debe ser tomada en dirección de salida de la máquina, para luego corrugarla.
- **Resistencia RCT:** en esta prueba la norma a seguir es a norma Tappi-T822 om-87. Esta prueba consiste en comprimir una muestra de papel que se coloca en un dispositivo que le da forma circular a la muestra. El dispositivo con la muestra va sobre una platina fija y cuando el plato superior comprime la muestra produce una deflexión en el centro de la platina fija y cuando el plato superior comprime la muestra produce una deflexión en el centro de la platina fija. El RCT indica la resistencia que tiene el papel cuando se encuentra sometida a una fuerza de compresión, repartida en un anillo de una circunferencia dada.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar del Estudio

La obtención de pulpa y la fabricación del papel de paja de arroz y sus evaluaciones se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Pulpa y Papel, Dpto. de Industrias Forestales de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Los ensayos de cartón se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad de la Empresa MPC Chillón, Ventanilla-Callao.

3.2 Materia Prima

Para realizar el presente estudio se utilizó muestras de paja de arroz (*Oryza sativa* L.), procedente de la región Lambayeque.

3.3 Materiales y Equipos

3.3.1 Equipos

- Desfibrador de Discos Bauer de 12 pulg.
- Desintegrador de 2 L.
- Balanza de 0,1 g de precisión
- Estufa de secado.
- Medidor de control de drenabilidad Schopper-Riegler.
- Clasificador de fibras Bauer Mc-Nett
- Prensa de platos fríos
- Formador de hojas
- Bomba de vacío y embudo Buchner
- Refinador PFI
- Clasificador de pulpa Noram con tamiz N° 150.

3.3.2 Materiales de laboratorio

- Probetas
- Pipetas
- Vasos *Pyrex* de 50, 100 y 250 mL
- Campana desecadora
- Pinzas

- Filtros de tela
- Discos metálicos
- Papeles secantes

3.3.3 Insumos

- Agua
- Hidróxido de Sodio
- Ácido clorhídrico
- Ácido sulfúrico
- Tiosulfato de sodio
- Mezcla etanol:benceno

3.4 Metodología

3.4.1 Colección y preparación de la materia prima

Procedencia de la materia prima

La materia prima para el presente estudio ha sido colectada en el departamento de Lambayeque, Provincia de Lambayeque, distrito de Mochumí, valle del río La Leche. La materia prima proviene de la cosecha de arroz del año 2001 de los meses de Julio y Agosto cuya colección se realizó manualmente en Enero del 2002, y se transportó empacada en sacos hacia el Laboratorio de Pulpa y Papel de la UNALM; se colectó 30 kg de muestra.

Picado de la materia prima

Posteriormente se picó la paja en forma manual con la ayuda de un machete, hasta lograr trozos de 5 cm. de longitud una cantidad de 10 kg de paja.

Determinación de humedad

De la muestra picada, se tomaron muestras al azar de cada saco para hallar el contenido de humedad promedio y obteniéndose como resultado 9,84 % de humedad.

3.4.2 Obtención de Pulpa por un Proceso de Alto rendimiento

3.4.2.1 Tratamiento químico

3.4.2.1.1 Estudios preliminares

La pulpa de paja de arroz fue obtenida mediante un proceso de alto rendimiento que implique un mínimo consumo de reactivos. Como reactivo químico se seleccionó al hidróxido de sodio (NaOH), éste reactivo tiene la capacidad de hinchar la materia prima en húmedo.

3.4.2.1.2 Condiciones de ensayos preliminares

Con la finalidad de obtener la cantidad de reactivo y el efecto que éste provoca en el proceso de pulpeo. Las condiciones de ensayo determinadas fueron las siguientes:

- Cantidad de materia prima: 400 g
- Cantidad de reactivo: 2 y 4 %
- Tiempo de tratamiento 24 horas
- Temperatura ambiente.
- Presión atmosférica

3.4.2.2 Obtención de pulpa

Se remojó 400 g de paja de arroz en tres soluciones de hidróxido de sodio: 0, 2 y 4 % con los siguientes parámetros:

- ◆ relación licor: paja de 20:1
- ◆ temperatura ambiente por 24 horas

Luego se procedió a lavar la paja con agua potable dejándola así libre de todo reactivo. Posteriormente se realizaron 2 etapas de desfibrado empleando un desfibrador de discos Bauer de 30 HP. Las distancias de los discos a utilizar son de 0,62 mm y 0,15 mm para la 1ra y 2da etapa respectivamente; además para el desfibrado se utilizará agua fría (promedio 20° C) y agua caliente (promedio 80° C).

3.4.2.2.1 Determinación de la humedad

Se tomó una muestra de 10 g de pulpa húmeda para el cálculo del contenido de humedad, por el método gravimétrico, según la Norma Técnica Peruana 251.010.

3.4.2.2.2 Cálculo de rendimiento del proceso

Con los valores de humedad y peso húmedo de la pulpa, se procedió al cálculo y determinación del rendimiento del proceso de pulpeo con respecto al peso inicial de la paja:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Pulpa seca}}{\text{Paja seca}} \times 100$$

3.4.2.3 Tamizado

Se tamizó la pulpa obtenida con la finalidad de separar los haces fibrosos de la pulpa en el equipo tamizador de pulpas *Noram* tamiz N° 5, con aberturas de 0,5 mm; la norma utilizada fue TAPPI U- 240.

3.4.2.4 Control de drenabilidad

Después del tamizado, se determinó el valor de drenabilidad de la pulpa utilizando el método Schopper Riegler (°SR) según norma SCAN M3-65.

3.4.3 Refinado

Previo a la definición de los niveles de esta variable, se hizo ensayos de refinado en el refinador PFI, primero a 5000 vueltas, quedando como resultado una pulpa con poca drenabilidad por efecto de la elevada cantidad de finos. Por consiguiente se optó por bajar el número de vueltas; en el cuadro N° 15 se presentan los valores de las características refinadas.

El refinado se realizó empleando un refinador PFI, conforme a la norma SCAN C: 18.

CUADRO 15: Características del Refinado de las Pulpas Evaluadas.

NIVEL DE ENSAYO	Velocidad angular del Rotor (rpm)	Entrehierro, distancia entre rotores (mm)	Intensidad de Refinado PFI (N° vueltas)
1	1440	0,2	0
2	1440	0,2	500
3	1440	0,2	1000

Un diagrama representando las etapas seguidas en el presente estudio, es presentado en la figura N° 03.

3.4.4 Evaluación de la materia prima y de la pulpa

3.4.4.1 Caracterización Química de la Materia Prima.

Se realizaron los siguientes análisis sobre la materia prima estudiada:

- Extractivos en alcohol benceno: norma TAPPI T6 os-59
- Cenizas: norma ISO R-1762
- Lignina Klason: Método TAPPI G.8
- Celulosa: Método *Kurschner y Hoffner*.
- Sílice: Método del Ácido Clorhídrico, norma TAPPI T-11m.

3.4.4.2 Evaluación de Fibras

- Clasificación de fibras, método *Bauer-Mc Nett*, norma TAPPI 233
- Longitud de Fibras: por microscopia, método del Laboratorio de Pulpa y Papel de la UNALM.
- Control de Refinado mediante el método Schopper Riegler, norma SCAN M3-65

3.4.4.3 Formación de papel para ensayo

- Se formaron las hojas de ensayo de acuerdo a la norma TAPPI 205 os-71
- Acondicionamiento de las hojas, según la norma nacional NTP 272:010, a 20° C de temperatura y 65 % de humedad relativa.

3.4.4.3.1 Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas

Las hojas después de ser acondicionadas fueron evaluadas con el propósito de determinar sus propiedades físicas y mecánicas, según las normas siguientes:

- Gramaje, espesor y humedad, según TAPPI 220 os-71
- Blancura infinita, según NTP 272 : 033
- Opacidad, según NTP 272 : 030
- Densidad aparente, según NTP 272 : 011
- Permeabilidad al aire, según NTP 272 : 018
- Resistencia a la tensión, al reventamiento, al rasgado y al alargamiento, según TAPPI 220 os-71.

3.4.4.4 Formación de cartón para ensayo

- Se formaron hojas de cartón de acuerdo a la norma NTP 272.016
- Acondicionamiento de las hojas de cartón, según la norma nacional NTP 272:010, a 20°C de temperatura y 65 % de humedad relativa.

3.4.4.4.1 Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas

- Espesor y Espesor según, norma TAPPI 220 os-71
- Resistencia al agua de la unión encolada del cartón corrugado, por inmersión según NTP 272.121
- Resistencia al Aplastamiento a la onda, método Cóncora, según la norma TAPPI- T809 om-93
- Determinación de resistencia al reventamiento, según NTP ISO-2759.
- Resistencia al aplastamiento en anillo RCT, según la norma TAPPI-T822 om-87.

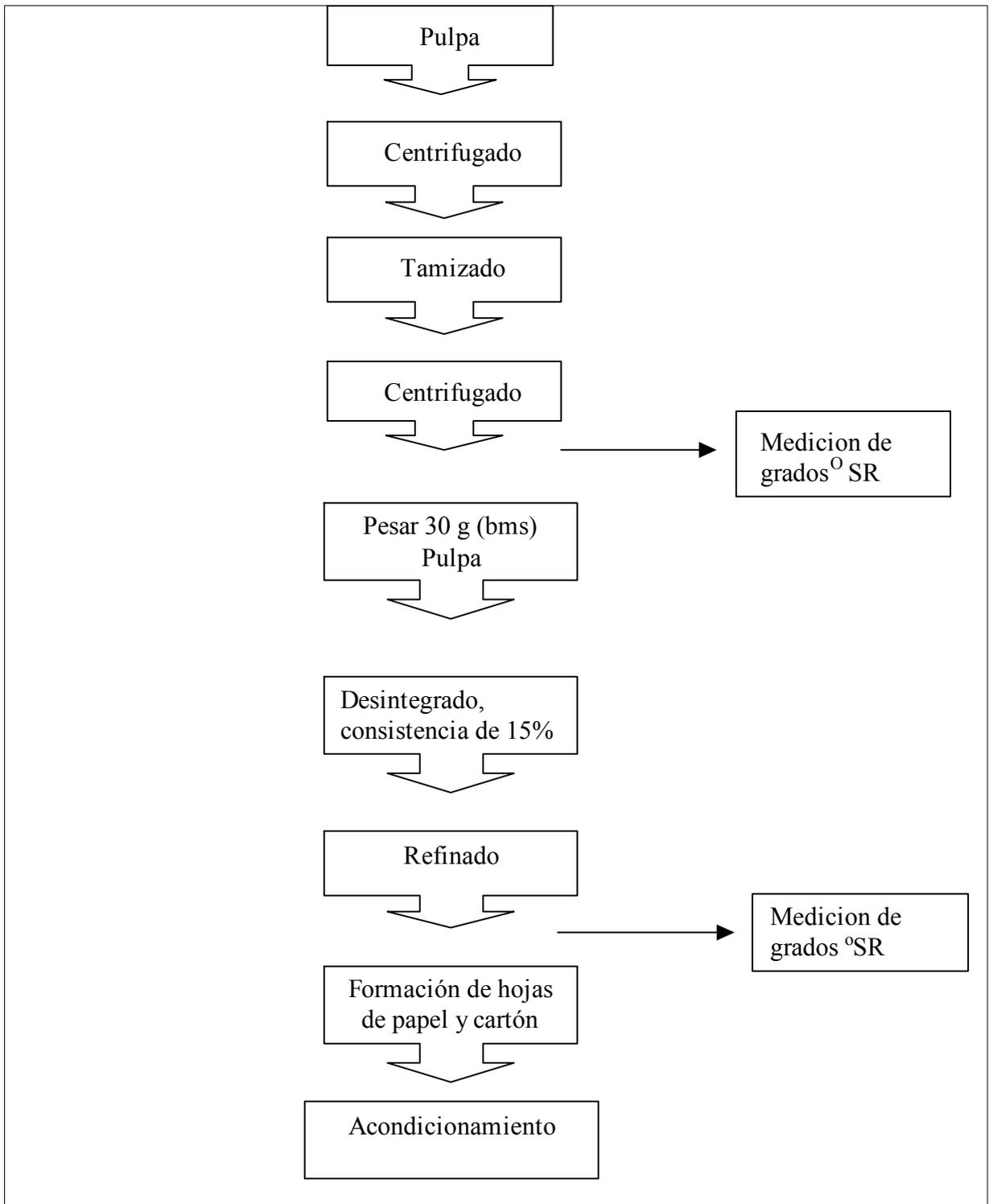


FIGURA 03. Diagrama del Proceso de Elaboración y Evaluación de Papel y Cartón

3.5 Diseño Experimental

La evaluación de los datos se realiza de acuerdo al plan experimental 3^2 (ver cuadro No 16), efectuada con la ayuda del programa "STATGRAPHICS" "plus" v.3.0, "STAT-PLUS" v.2.0, "STATISTICA" V.2.0. La evaluación consiste en evaluar en el diseño factorial, para cada hoja de papel, los efectos de las 2 variables (3 niveles), y sus interacciones sobre las respuestas de los resultados. El diseño se aplica en dos bloques y el orden de los experimentos tiene que ser completamente randomizado, esto proporciona protección contra los efectos que puedan tener las variables y las interacciones que tienen un efecto significativo. El análisis estadístico de la influencia de las variables sobre los resultados se efectuará previa evaluación del análisis de varianza mediante la prueba Fisher o "F", se tomará como referencia de confianza de 95 % de probabilidad ($p=0,05$); eventualmente este valor podría variar a fin de explicar algunos resultados.

CUADRO 16: Plan Experimental del presente trabajo

Factor A: Pre-tratamiento Químico Na OH%	Factor B: Temperatura del agua durante el pulpeo:						Total
	B1 (14 °C)			B2 (80 °C)			
	Factor C: Refinado PFI: (N° vueltas)			Factor C: Refinado PFI: (N° vueltas)			
	C1 (0)	C2 (500)	C3 (1000)	C1 (0)	C2 (500)	C3 (1000)	
A1 (0%)	A1B1C1	A1B1C2	A1B1C3	A1B2C1	A1B2C2	A1B2C3	6
A2 (2%)	A2B1C1	A2B1C2	A2B1C3	A2B2C1	A2B2C2	A2B2C3	6
A3 (4%)	A3B1C1	A3B1C2	A3B1C3	A3B2C1	A3B2C2	A3B2C3	6
Total Ensayos	3	3	3	3	3	3	18

Todos los valores originales de ensayo para cada combinación de pulpa se encuentran en el anexo 19.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización de la Materia Prima

4.1.1 Análisis químico

La paja de arroz (*Oryza sativa* L.), fue sometida a diversos ensayos químicos con la finalidad de evaluar sus características. Los resultados obtenidos se observan en el Cuadro 17.

CUADRO 17: Resultados de los análisis químicos de la paja de arroz (*Oryza sativa* L.)

ENSAYO	RESULTADO
Contenido de Humedad	9,84 %
Celulosa	44,8 %
Lignina	23,9 %
Cenizas	18,0 %
Sílice	13,5 %
Extractivos AB	6,6 %
Solubilidad H ₂ O fría	13,8 %
Solubilidad H ₂ O caliente	17,5 %
Solubilidad NaOH 1%	45,7 %

La paja de arroz estudiada presenta un 44.8 % de contenido de celulosa (cuadro 17), siendo este valor menor a los valores que arrojan otras fibras no madereras como el bagazo de caña o el kenaf (ver cuadro 03). Sin embargo, el contenido de celulosa de la paja de arroz del presente estudio, es aceptable comparando con los contenidos de celulosa observados en otras pajas, las que se encuentran en el rango de 28 – 51 % (cuadro 05) y los contenidos de celulosa de fibras madereras latifoliadas y coníferas (cuadro 04). En tal sentido, la paja de arroz ofrece una buena perspectiva para ser destinada a la obtención de pulpas celulósicas.

Por otro lado, el contenido de lignina, resultó muy alto (23.9 %), si se compara con los resultados publicados en la literatura citada. Probablemente, algunos compuestos no se llegaron a degradar por completo en el ensayo, lo cual alteró el porcentaje de lignina; cabe mencionar

que en la muestra se incluyen también los nudos del tallo, lo que podría variar los valores normales de lignina. Teóricamente la paja de arroz tiene de 12 – 16 % de lignina (cuadro 04) en su composición química, el cual es considerado un valor bajo, si se compara con los valores de otras materias (incluyendo madereras y no madereras). Por lo tanto, este valor indica que para la obtención de pulpa química de paja de arroz, se necesitará bajas concentraciones de reactivos o tratamientos químicos suaves sobre la materia prima.

Los contenidos de cenizas y sílice, son superiores a los valores obtenidos de cualquier otra materia prima para pulpa (ver cuadros 04 y 05) aunque coinciden con los valores obtenidos por otros autores, con la misma materia prima. Estos valores indican que, aparentemente la paja de arroz se comportará como un material abrasivo, sobre todo por su contenido de sílice (13.5%), lo que obligaría a la recomendación de modificar el material de los discos refinadores, haciéndolos más resistentes a la abrasión. En cuanto al contenido de cenizas, el valor arrojado en el presente trabajo fue de 18 %. Según la literatura citada el rango para este valor está entre 15 – 20 %, si bien el resultado obtenido se encuentra dentro del rango, este es ligeramente alto. En un artículo, publicado por Paramonga (1975), se observó que el % de cenizas en la paja es alto cuando se incluye muchos entrenudos y hojas, probablemente esta es la causa por la que el valor de cenizas obtenido es alto, debido que, en el proceso de desfibrado de la paja se incluyeron los entrenudos.

Los extraíbles en alcohol-benceno de la paja de arroz (6,6 %), son superiores si los comparamos con las latifoliadas y coníferas, siendo estos valores 2,09 y 1,29 % en promedio, respectivamente (Jiménez, 1993). Esto indica que la paja de arroz contiene mayor contenido de sales y carbohidratos de bajo peso molecular que las maderas, los cuales disminuyen el rendimiento de la pulpa durante el refinado, al lixiviar de la pared celular cuando la célula esté hinchada, producto del refinado. Igualmente ocurre con los solubles en agua fría y en agua caliente (13,8 y 17,5 % respectivamente), cuyos valores resultaron ser superiores al ser comparados con los de maderas latifoliadas - 3,32 % - y los de coníferas - 1,54 %; (Jiménez 1993).

El alto contenido de hemicelulosas presente en la paja de arroz, influye en la disminución del rendimiento, debido a que estas se degradan fácilmente durante el pre-tratamiento químico. Sin embargo, la presencia de estas hacen que la paja se hidrate más fácilmente, respondiendo más rápido al refinado, disminuyendo el tiempo de esta operación y a su vez la reducción del consumo de energía.

4.1.2 Clasificación de Fibras

La pulpa de paja de arroz fue sometida a una clasificación de fibras, mediante el método Bauer Mc Nett. Para la clasificación, se tomaron muestras de pulpas con los valores extremos del pre-tratamiento y el grado de refinado (ver cuadro 18), con la finalidad de resaltar el cambio de la composición de fibras, conforme aumenta la concentración del reactivo y el grado de refinado, ya que esta composición, se relacionan con algunos resultados de la presente investigación.

CUADRO 18: Resultados de la clasificación de fibras por el método Bauer Mc Nett de pulpas de paja de arroz (*Oryza sativa* L.)

Soda (%)	Refinado (No vueltas)	Fracción por tamiz	Fibras Retenidas (%)	
			Agua Fría	Agua Caliente
0	0	+30	23	18
		-30/+50	18	22
		-50/+100	17	22
		-100/+200	7	6
		-200	35	32
	1000	+30	16	12
		-30/+50	19	10
		-50/+100	18	25
		-100/+200	15	5
		-200	31	47
4	0	+30	22	17
		-30/+50	6	24
		-50/+100	27	12
		-100/+200	14	12
		-200	31	36
	1000	+30	14	7
		-30/+50	6	20
		-50/+100	27	9
		-100/+200	14	15
		-200	31	48

Se observa en el cuadro anterior que la proporción de fibras largas es mayor en las pulpas obtenidas con agua fría que con agua caliente.

Cuadro 19: Clasificación de Fibras Retenidas, por tamaño de fibra, según # Vueltas del Refinado y Carga de NAOH aplicado

Soda (%)	Refinado (N° vueltas)	Tipo de fibra	Fibras Retenidas (%)	
			Agua Fría	Agua Caliente
0	0	Fibras largas	41	40
		Fibra cortada	17	22
		finos	42	38
	1000	Fibras largas	35	32
		Fibra cortada	18	25
		finos	46	52
4	0	Fibras largas	28	41
		Fibra cortada	27	12
		finos	45	48
	1000	Fibras largas	20	27
		Fibra cortada	27	9
		finos	45	63

Fibra larga o entera: fracción +30 y -30/+50; fibra cortada fracción -50/+100; finos, fracciones -100/+200 y -200

4.2 Rendimiento de las pulpas de alto rendimiento de paja de arroz.

Las pulpas de paja de arroz obtenidas por el método utilizado, dieron como resultado los valores que se muestran a continuación en el cuadro N° 20.

CUADRO 20: Rendimiento del proceso de pulpeo de alto rendimiento de paja de arroz

Pulpeo	Cantidad de NaOH (%)		
	0	2	4
Agua fría	81,49 %	81,23 %	80,55 %
Agua caliente	88,45 %	88,44 %	86,92 %

Como se puede apreciar en el cuadro anterior, la relación que existe entre la concentración de NaOH y el rendimiento de pulpa de paja de arroz es inversamente proporcional, es decir, a medida que aumente la cantidad de NaOH en el pre-tratamiento químico de la paja, los valores de rendimiento disminuyen; las tendencias de disminución se observan en la figura 04.

La explicación del efecto del reactivo aplicado en el tratamiento, se debe en parte, al efecto de la soda sobre los carbohidratos de bajo peso molecular y fracciones amorfas, como las hemicelulosas y las regiones amorfas de la celulosa que en su conjunto constituyen una fracción importante de la masa de la paja de arroz. Los resultados de alta solubilidad de la materia en NaOH, cuadro N° 17, corroboran lo antes mencionado.

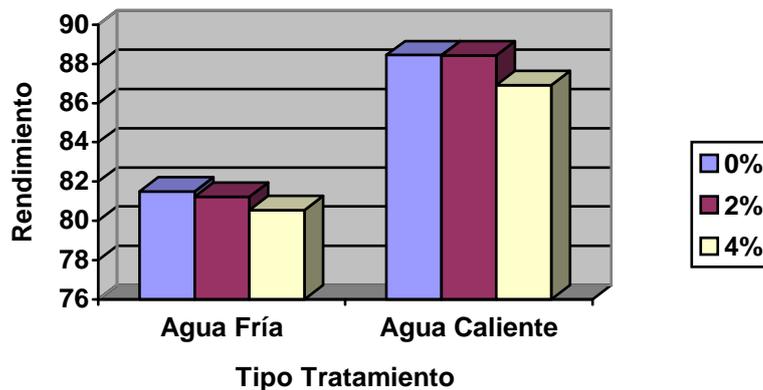


FIGURA 04: Variación del Rendimiento de Pulpa en Función del Tipo de Tratamiento y el % de Reactivo

Se observa que, el rendimiento aumenta si hay un incremento en la temperatura del agua utilizada en el proceso de pulpeo. El rendimiento disminuye, por efecto de la menor temperatura antes del desfibrado porque provoca que la materia fibrosa mantenga su rigidez, condición que es desfavorable para soportar los esfuerzos de desfibrado, lo que a su vez provoca la formación de finos o elementos muy pequeños que atraviesan el tamiz durante el tamizado. Esta característica es la causa de la disminución de la masa de pulpa y por consiguiente el menor rendimiento de pulpeo. Los finos afectan el rendimiento, por cuanto la pulpa producida en el refinador de discos, se lava en una malla 140, que tiene una abertura de 60 micras. Por lo que se pierde parte de la pulpa, afectando así el rendimiento del proceso.

4.3 Drenabilidad de la pulpa

4.3.1 Drenabilidad de la pulpa en proceso con agua fría

La superficie de respuesta de la variación de los valores de la drenabilidad, expresada en grados *Schopper Riegler*, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y los número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 05; los valores originales se muestran en el anexo 01.

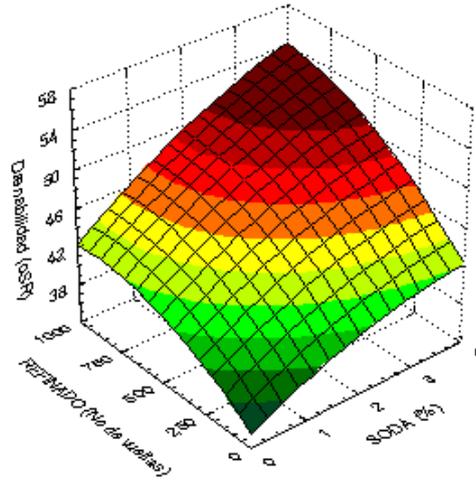


FIGURA 05: Superficie de respuesta de las variaciones de la drenabilidad en función de los valores de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión de la drenabilidad en función de las variables mencionadas es:

$$\text{Drenabilidad (}^\circ \text{SR)} = 44,78 + 4,67 * \text{Soda} + 4,67 * \text{refinado}$$

El análisis estadístico, con coeficiente de regresión de 84,56 %, indica que existe una influencia directa de los niveles de soda y refinado, en la misma medida para ambos, sobre los valores de la drenabilidad. Siendo los valores de control de refinado ($^\circ$ SR) contrarios al concepto de drenabilidad, la explicación de los resultados se describe como la disminución de la drenabilidad por el aumento de la concentración de NaOH y el número de vueltas del refinado PFI. Los factores, observados en la ecuación, de los niveles de concentración de soda en el pre-tratamiento y números de vueltas en el PFI, tienen coeficiente positivo.

La disminución de la drenabilidad de la pulpa por efecto de la soda es explicada, aparentemente por la disolución de los componentes de parénquima y células epidérmicas, cuya constitución es susceptible de descomposición por efecto de un pH elevado, dando lugar, de esta manera, a la presencia de partículas finas, no disueltas, que favorecen la retención del agua en la pulpa y por consiguiente retardando la drenabilidad de la misma. Además se puede observar que en pulpas sin pre-tratamiento químico (0 % de soda), la drenabilidad es alta, debido a la falta de

habilidad de enlace entre fibras, lo que permite el paso del agua. En el caso de los niveles de refinado, el mayor número de vueltas implica una mayor energía de refinado sobre las fibras las que a su vez se ven afectadas en su estructura física, dando lugar a la formación de finos con la consiguiente disminución de la drenabilidad.

4.3.2 Drenabilidad de la pulpa procesada con agua caliente

La superficie de respuesta de las variaciones de la drenabilidad, expresada en grados *Schopper Riegler*, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 06, y los valores originales se muestran en el anexo 02.

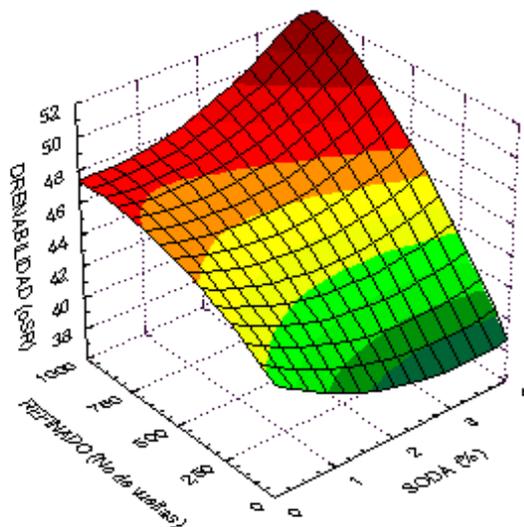


FIGURA 06: Superficie de respuesta de las variaciones de la drenabilidad en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI

La ecuación de regresión para la drenabilidad en función de las variables es:

$$\text{Drenabilidad (}^{\circ}\text{SR)} = 45,44 + 4,67 \cdot \text{Refinado} + 2,5 \cdot \text{Soda} \cdot \text{Refinado}$$

Para este análisis estadístico con un coeficiente de regresión del 74 % indica que existe una relación directa, con coeficiente positivo, entre el número de vueltas, del refinador PFI, y la drenabilidad de la pulpa. Sin embargo, también se puede observar, que existe una influencia combinada de las variables de refinado y concentración de soda, siendo esta influencia, un poco más de la mitad de la que ejerce el refinado como variable independiente.

Para este resultado, la explicación del efecto que ejerce la concentración de soda y el número de vueltas (PFI) en la pulpa, es similar a las ensayadas líneas arriba. No obstante, al utilizar agua caliente en el proceso de desfibrado, produjo un cambio en el registro de los grados °SR, en la pulpa obtenida.

Si se compara las ecuaciones de regresión de la pulpa procesada con agua caliente y la procesada con agua fría, se puede encontrar que en la primera, la influencia de las variables soda y número de vueltas en el refinador PFI, se producen en la misma intensidad. En cambio, en la pulpa con agua caliente la variable que más influye es el grado de refinado. Esto se puede explicar, probablemente porque la utilización de agua caliente hace que las fibras de la paja de arroz, ingresen al desfibrador menos rígidas que cuando ingresan con agua fría, por lo que el proceso genera menos finos y por consiguiente, sube la drenabilidad, o baja el valor *Schopper Riegler*. Entonces, si bien el incremento de la concentración de soda influye en la generación de finos, la ayuda del agua caliente hizo que éste efecto disminuya, con respecto a la otra pulpa, y el efecto del refinado resulte más importante en este proceso; ver figura N° 07.

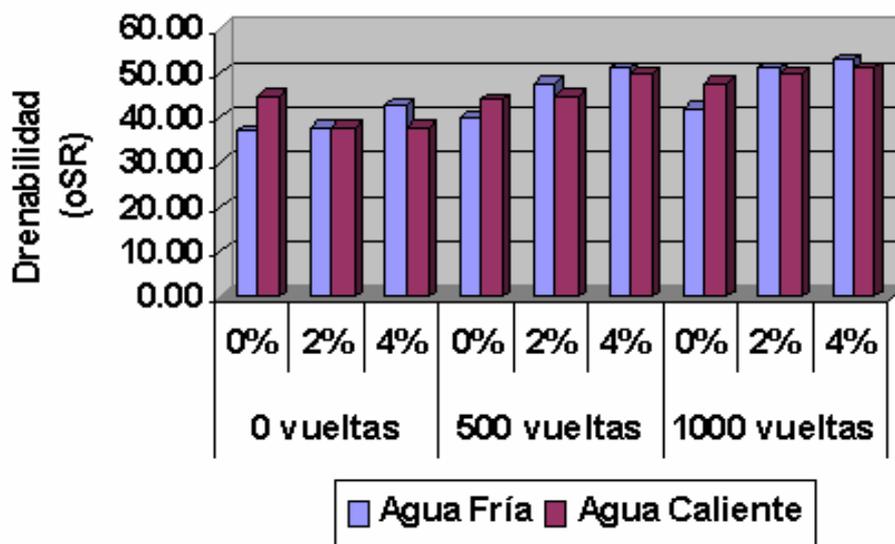


FIGURA 07: Drenabilidad medida en Grados Schopper (°SR), obtenidos en pulpas procesadas con agua fría y agua caliente.

Como se puede observar en la figura anterior, los valores de drenabilidad no muestran una gran variación, comparando las pulpas obtenidas con agua fría y agua caliente; incluso, ambas muestran la misma tendencia, conforme aumenta el número de vueltas en el refinado, aumenta la lectura de los °SR. Sin embargo, los valores más altos de drenabilidad se obtienen con mayor porcentaje de reactivo y mayor número de vueltas en el refinado PFI.

4.4 Densidad de la pulpa

4.4.1 Densidad de la pulpa en agua fría

La superficie de respuesta de las variaciones de la densidad, expresada en gramos por centímetro cúbico, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura N° 08; los valores originales se muestran en el anexo 03.

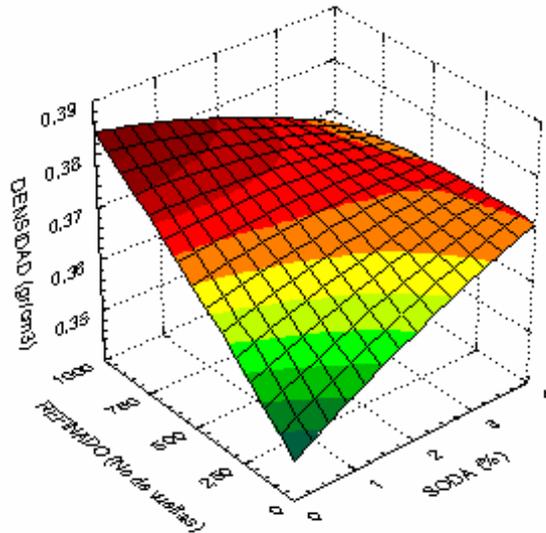


FIGURA 08: Superficie de respuesta de las variaciones de la densidad en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la densidad en función de las variables concentración de NaOH y número de vueltas PFI es:

$$\text{Densidad (g/cm}^3\text{)} = 0,372 + 0,0067*\text{Soda} + 0,01*\text{Refinado}$$

El análisis estadístico de la densidad, dio como resultado un coeficiente de regresión bajo, 31.14 %, lo que resta validez a la ecuación de predicción de la densidad. La ecuación de regresión muestra que la influencia que ejerce la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI, es directamente proporcional a la densidad. Es decir, a medida que aumentan estas dos variables aumenta la densidad de la pulpa. Por otro lado, también se puede observar que la influencia de las variables se realiza en diferentes proporciones, siendo mayor la del número de vueltas del refinado PFI.

La densidad del papel se ve afectada principalmente por el grado de refinación de la pulpa, debido a que al aumentar el número de vueltas en el PFI, las fibras se flexibilizan, disminuyen en longitud y producen material fino que son los responsables de rellenar los espacios vacíos en la hoja de papel, de manera tal que la densidad de la hoja de papel aumenta.

La densidad es una propiedad que proporciona información sobre la estructura de la hoja, y está relacionada con la mayoría de las propiedades del papel, especialmente la porosidad, la flexibilidad de la hoja, resistencia, y las propiedades ópticas y físicas del papel, mejorándolas conforme se incrementa el valor de densidad. Por otro lado, esta propiedad es importante también porque le da buena predisposición al papel para la impresión, debido a la mejor absorción y fijación de tintas.

4.4.2 Densidad de la pulpa en agua caliente

La superficie de respuesta de las variaciones de la densidad, expresada en gramos por centímetro cúbico, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura N° 09, y los valores originales se muestran en el anexo 04.

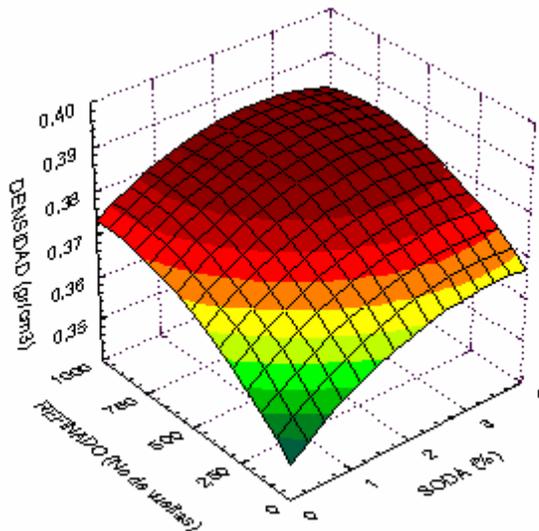


FIGURA 09: Superficie de respuesta de las variaciones de la densidad en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la drenabilidad en función de las variables es:

$$\text{Densidad (g/cm}^3\text{)} = 0,37222 + 0,00667*\text{Soda} + 0,01*\text{Refinado}$$

Para este análisis estadístico, el coeficiente de regresión es del 51,9 %, resultando esta prueba más confiable, estadísticamente hablando, que la prueba que se hizo a la pulpa con agua fría. Sin embargo, los coeficientes que acompañan, a las variables en la ecuación de regresión, son similares a los que presenta la ecuación del estudio realizada a la pulpa procesada con agua fría.

La densidad del papel, se ve afectada principalmente por la cantidad de finos presentes en la pulpa, tal como se explicó anteriormente en el ensayo de la pulpa con agua fría. Como se puede apreciar en el la figura 10, las pulpas con agua fría y caliente sin refinar nos muestran el efecto que la concentración de reactivo produce en ellas. En el caso de la pulpa con agua fría, conforme se va aumentando la cantidad de soda, aumenta la densidad, producto del llenado de espacios libres por los finos generados durante el proceso. En cambio, el agua caliente usada en la otra pulpa, hace que las fibras se separen sufriendo menos desprendimientos de elementos finos, por lo que la combinación de soda y agua caliente producen pulpas con menos cantidad de finos y por lo tanto disminuye la densidad.

A medida que aumenta el grado de refinación, en la pulpa con agua fría, la densidad varia, sube y luego baja, probablemente por la irregular distribución de finos que se generaron en el proceso. En apariencia, una parte de los finos pertenecientes a la malla 200 se pasaron por las aberturas de la formadora de papel con malla 140, disminuyendo la densidad. Por otro lado, la densidad llega a su valor máximo en pulpas procesadas con agua caliente y 1000 rev. en el refinador PFI, sin que tenga influencia la concentración de reactivo en el pre-tratamiento. Probablemente, esto puede hacer concluir que en pulpas con agua caliente, la densidad es influenciada por el grado de refinación y no por la cantidad de NaOH usada.

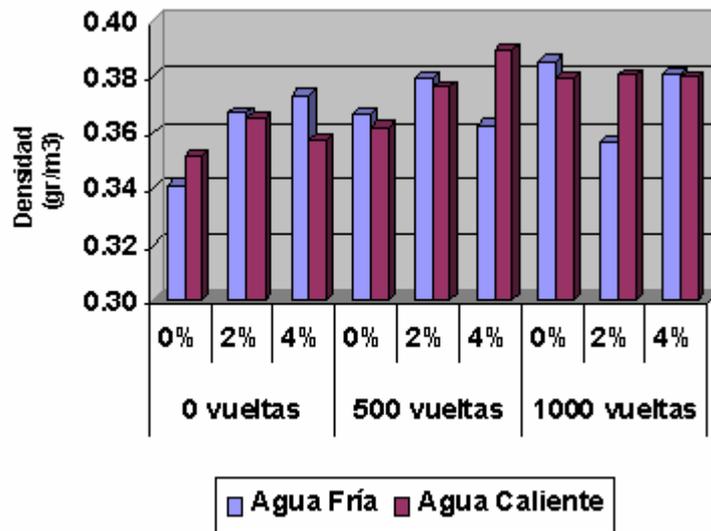


FIGURA 10: Densidad de pulpas procesadas con agua fría y agua caliente en función de la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI.

4.5 Espesor

4.6.1 Espesor de hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría

La superficie de respuesta de las variaciones del espesor, expresada en micrómetros, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 11, y los valores originales se muestran en el anexo 05.

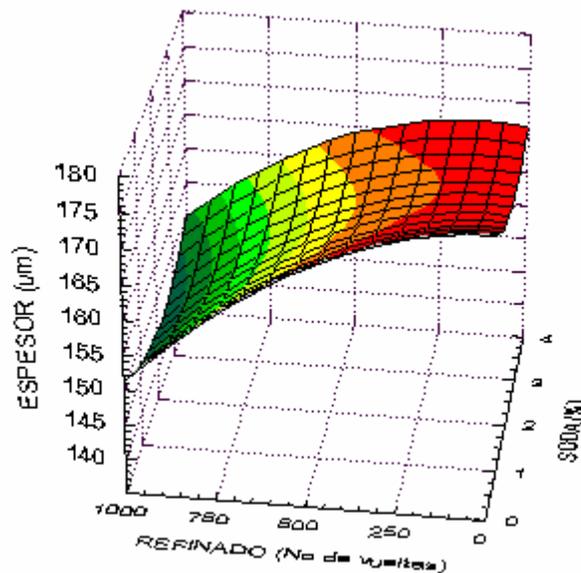


FIGURA 11: Superficie de respuesta de las variaciones del espesor en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para el espesor en función de las variables es:

$$\text{Espesor } (\mu\text{m}) = 161,0 - 10,3167 * \text{Refinado}$$

En este análisis estadístico, con un coeficiente de regresión del 64,7 %, indica que existe una relación lineal e indirecta entre el espesor de la hoja de papel y el refinado, con un nivel de significancia del 99,46 %; es decir a mayor grado de refinación, la lectura del espesor de la hoja disminuye.

El espesor es una propiedad que se ve afectada, al igual que la densidad, por el grado de refinación. En hojas en las que la refinación es mínima, se obtienen hojas con mayor calibre con respecto a las hojas con mayor grado de refinación. Las fibras, al ser más rígidas, producen hojas más burdas, además que este tipo de pulpas presenta “shives” o paquetes de fibras que pueden formar “grumos” en la hoja formada, lo que provocaría variaciones en la lectura del calibre o espesor. En el caso de pulpas refinadas, las fibras se hacen más flexibles y ayudan a la formación de hojas más delgadas.

El espesor es una propiedad muy importante desde el punto de vista del uso final del papel, debido a que al variar el espesor, el manejo del papel en algunas máquinas se dificulta; además se ven afectadas casi todas sus propiedades físicas, ópticas y eléctricas del papel. El espesor es en especial, importante por su uniformidad para papeles para impresión, cajas plegadizas para ser llenadas en máquinas automáticas, tarjetas para índices y fólderres entre otros. En consecuencia, la importancia del espesor del papel no radica en si la lectura es mayor o menor, sino mas bien en la uniformidad de esta, en una misma producción; debido que a diferentes usos del papel, existe un determinado espesor como especificación técnica.

4.5.2 Espesor de hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente

La superficie de respuesta de las variaciones del espesor, expresada en micrómetros, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura N° 12, y los valores originales se muestran en el anexo 06.

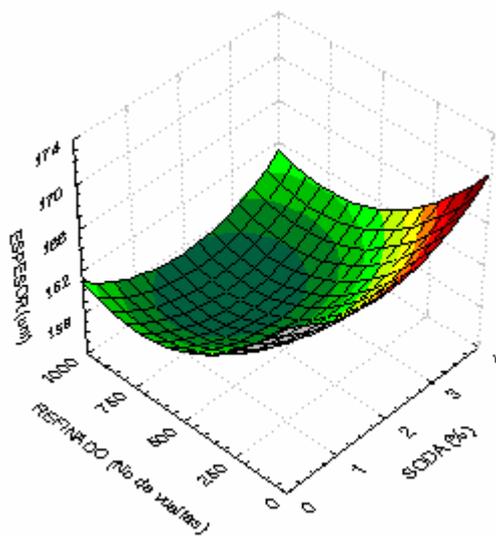


FIGURA 12: Superficie de respuesta de las variaciones del espesor en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para el espesor en función de las variables es:

$$\text{Espesor } (\mu\text{m}) = 157,3 - 4,5 \cdot \text{Refinado} + 3,75 \cdot \text{Soda}^2 + 4,5 \cdot \text{Refinado}^2$$

Para este análisis estadístico, la ecuación tiene un coeficiente de regresión del 86,6 %, indica que existe una relación cuadrática entre el espesor de una hoja de papel con el grado de refinación y la concentración de soda; siendo el grado de refinación el factor que mayor influye, de manera inversa, en este ensayo en comparación con la concentración de soda. El nivel de confianza para los dos factores es altamente significativo.

Al igual que en el caso de la pulpa procesada con agua fría, el grado de refinación influye en relación inversamente proporcional al espesor de la hoja, como ya se explicó anteriormente. Sin embargo, se observa en este caso que la cantidad del reactivo también tiene influencia en el aumento o disminución del espesor de las hojas de pulpa tratadas con agua caliente. Si se observa la figura 13, las variaciones de la lectura del espesor no son muy marcadas, conforme va aumentando la concentración del reactivo.

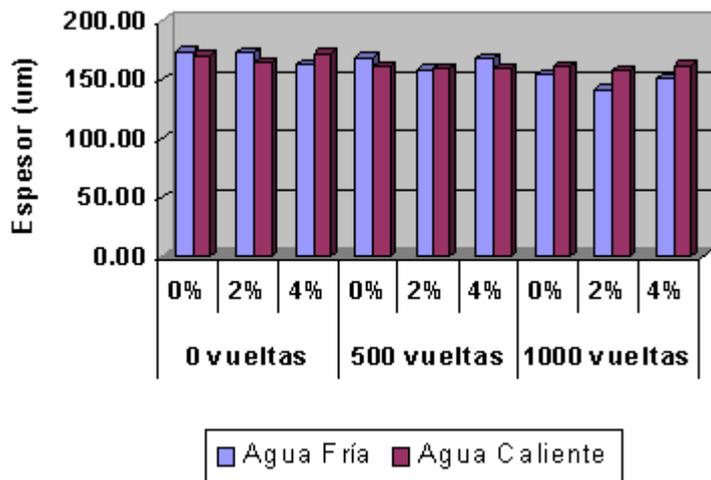


FIGURA 13: Espesor de hojas de pulpas procesadas con agua fría y agua caliente en función de la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI.

Comparando las pulpas de agua fría con agua caliente, se puede notar que las variaciones del espesor en pulpas con agua fría son aparentemente más notorias que las pulpas con agua caliente, posiblemente porque las fibras de estas últimas son más flexibles, lo que hace que un aumento en el refinado no maltrate a las fibras sin cortarlas o desprender mayor cantidad de

finos. Por otro lado, se observa que la tendencia de la disminución del espesor, como consecuencia del aumento del grado de refinación, de manera similar para los tratamientos, con agua fría y agua caliente, en las pulpas del presente estudio.

4.6 Blancura

4.6.1 Blancura de hoja de ensayo de pulpa en agua fría

La superficie de respuesta de las variaciones de la blancura, expresada en porcentaje, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 14, y los valores originales se muestran en el anexo 07.

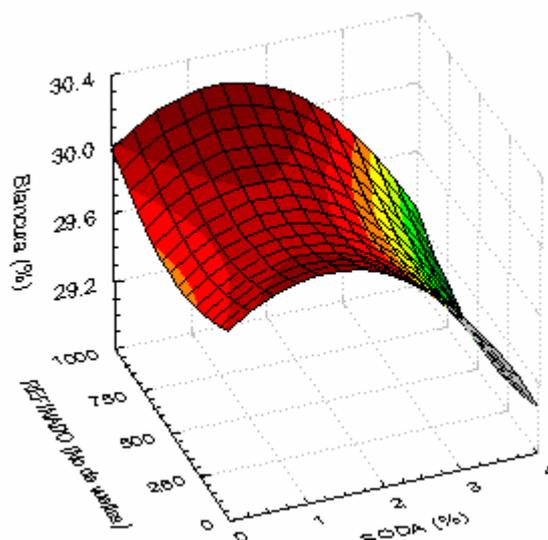


FIGURA 14: Superficie de respuesta de las variaciones de la blancura en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la blancura en función de las variables es:

$$\text{Blancura (\%)} = 30,03 - 0,3833 \cdot \text{Soda} - 0,55 \cdot \text{Soda}^2$$

El análisis estadístico indica, con un coeficiente de regresión del 70,9 %, que existe una relación cuadrática entre la concentración de soda y la blancura; además la relación es

inversamente proporcional: conforme aumenta la concentración del reactivo, disminuye la blancura de la hoja de papel.

La blancura de la hoja de papel, se basa en la medición de la reflexión de luz bajo una sola longitud de onda en la región azul del espectro, con longitud de onda de 457 nm. Esta propiedad óptica del papel se vio afectada principalmente por la cantidad de reactivo utilizado en el pre-tratamiento de la paja, debido a una reacción alcalina, formando aparentemente compuestos cromógenos, de la soda con los componentes químicos, lignina y carbohidratos.

El grado de refinación no tuvo influencia significativa, aunque la blancura de la hoja de papel puede disminuir con el aumento del número de vueltas en el PFI, al disminuir el espesor de la hoja y por consiguiente disminuyen los valores de la reflexión de la luz.

4.6.2 Blancura de hoja de ensayo de pulpa en agua caliente

La superficie de respuesta de las variaciones de la blancura, expresada en porcentaje, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 15; los valores originales se muestran en el anexo 08.

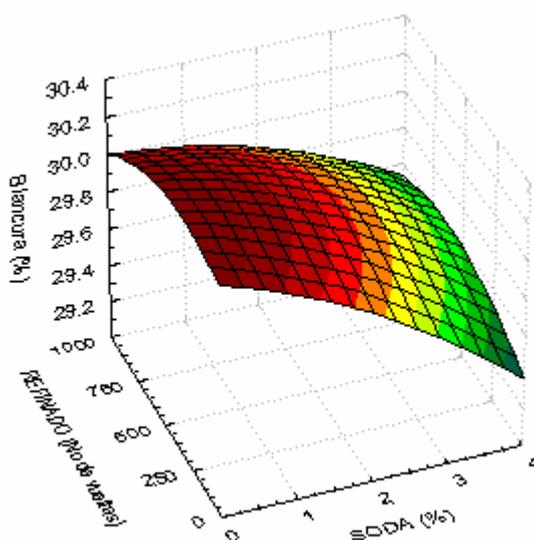


FIGURA 15: Superficie de respuesta de las variaciones de la blancura en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la blancura en función de las variables en estudio es:

$$\text{Blancura (\%)} = 29,87 - 0,33 * \text{Soda}$$

Para este ensayo, el análisis estadístico con un coeficiente de regresión del 63,4 %, indica que el factor soda tiene una relación lineal e inversa con la blancura de la hoja de papel. La explicación de la influencia de la soda en la reflexión de la luz en la hoja de papel, es similar al ensayado en el punto 4.7.1.

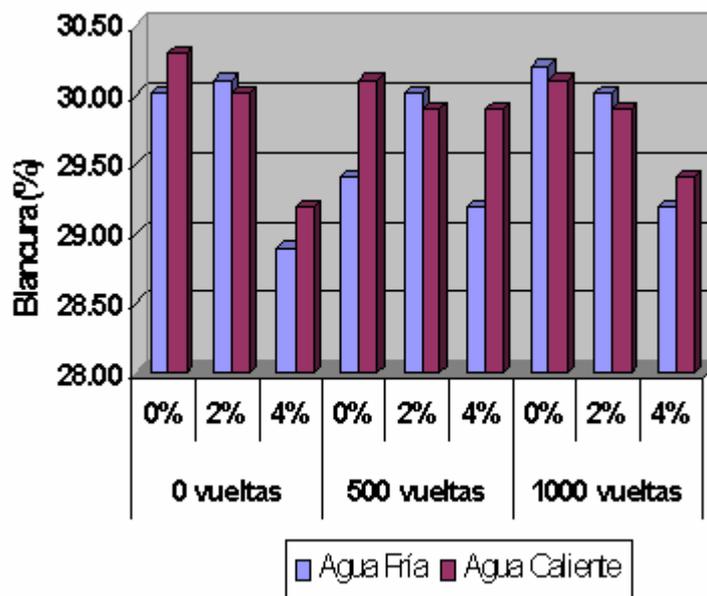


FIGURA 16: Blancura de hojas de pulpas procesadas con agua fría y agua caliente en función de la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI.

En la figura 16, se aprecia que la variación en la blancura de las hojas de papel, muestra la misma tendencia en hojas de pulpa con agua caliente y con agua fría. Sin embargo, existen diferencias, sin variación definida, en la lectura de la reflexión de la luz, por efecto del incremento de la temperatura en el agua utilizada en el proceso de pulpeo, tal como se observa en los valores de blancura de las pulpas obtenidas con 0 % de reactivo. Sin embargo, en las pulpas con 2 % de reactivo, las diferencias son mínimas entre agua fría y agua caliente. Respecto a la influencia del refinado, aparentemente en el caso de agua caliente produce hojas

con valores de blancura estables, así aumente el grado de refinación o la concentración del reactivo. En resumen, la blancura disminuye por efecto de la mayor temperatura y mayor valor de reactivo durante el pulpeo.

4.7 Opacidad

4.8.1 Opacidad en la hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores de opacidad, expresada en porcentaje, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 17, y los valores originales se muestran en el anexo 09.

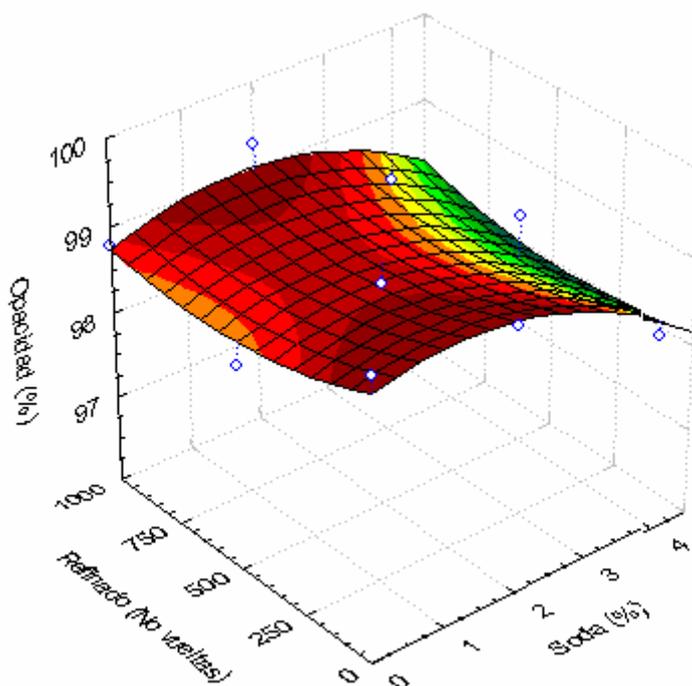


FIGURA 17: Superficie de respuesta de las variaciones de la Opacidad en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la opacidad en función de las variables es:

$$\text{Opacidad} = 99,0 - 0,216667 * \text{Soda} - 0,383333 * \text{Soda}^2$$

Para este análisis estadístico, el coeficiente de regresión resultó bajo, 22,18 %, lo cual hace que el ensayo no presente confiabilidad. La ecuación muestra que existe sólo influencia de la cantidad de reactivo aplicada; no hubo influencia significativa del refinado. La relación de los valores de opacidad con el reactivo es cuadrática pero con una influencia negativa.

Cuando la luz choca con un objeto, se refleja, transmite, o absorbe. En ese sentido, la opacidad se determina mediante el total de luz transmitida. La transparencia tiene relación con la opacidad, pero difiere en que se determina por la cantidad de luz que se transmite sin dispersión. Un papel perfectamente opaco es aquel que resulta totalmente impenetrable al paso de la luz visible. La opacidad es una propiedad importante en los papeles para impresión y para escribir y por lo general, forma parte de las especificaciones relativas a dichos papeles.

La cantidad del reactivo es el factor que más influye en la opacidad, quizá porque la soda genera mayor contacto óptico entre fibras, lo que permite una disminución en la dispersión de la luz, y por consiguiente disminuye la opacidad. La soda disminuye la cantidad de elementos finos o diluye mayor cantidad de componentes no celulósicos, lo que favorece el mayor contacto entre las fibras celulósicas. Según Brandon (1991), la opacidad de una hoja de papel hechas con fibra de celulosa se debe fundamentalmente a la dispersión de la luz cuando pasa del aire a la fibra y de nuevo al aire, en cambio cuando se produce unión entre fibras, la luz puede pasar de una fibra a otra sin pasar por el aire, no produciéndose así dispersión en estos puntos; a esto se le conoce como contacto óptico.

4.8.2 Opacidad en la hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente.

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores de opacidad, expresada en porcentaje, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura N° 18, y los valores originales se muestran en el anexo 10.

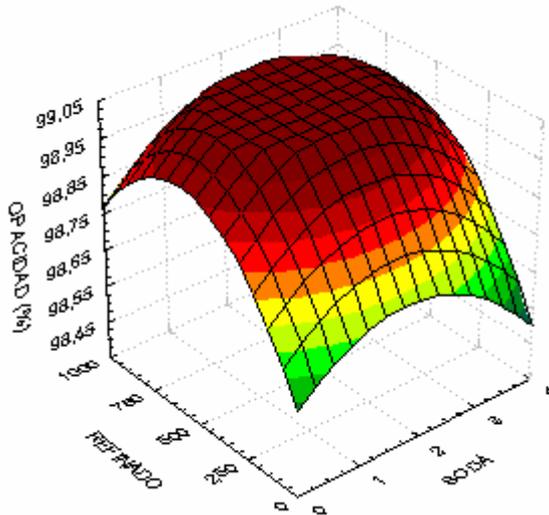


FIGURA 18: Superficie de respuesta de las variaciones de la blancura en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la opacidad en función de las variables es:

$$\text{Opacidad} = 99,1222 + 0,1167 \cdot \text{Refinado} - 0,1833 \cdot \text{Soda}^2 - 0,2833 \cdot \text{Refinado}^2$$

El análisis estadístico con un coeficiente de regresión del 67,31 %, indica que existe una relación lineal y directamente proporcional entre el grado de refinación y la opacidad, aunque con un nivel de significancia del 92,7 %. Asimismo, el grado de refinación tiene un efecto cuadrático, negativo, sobre los valores de la opacidad. Por otro lado, la concentración de soda muestra una relación cuadrática e inversa con los valores de opacidad. La explicación de la influencia de la soda en la opacidad de la hoja de papel, es similar a la ensayada en el punto 4.8.1.

En cuanto al grado de refinación, se observa que existen dos efectos, directo e inverso, en la opacidad. Como se observa en la figura 19, al aumentar el número de vueltas en el refinador PFI, aumenta la opacidad; sin embargo al sobrepasar el valor de 500 vueltas en el PFI, la opacidad disminuye. El aumento de la opacidad por efecto del aumento del batido, se explica por el aumento del área superficial de las fibras, pero con aún con menores puntos de contacto

entre fibras, en las que puede producirse todavía la dispersión interna de la luz, pero con poca luz transmitida.

No obstante, existe el efecto negativo para la opacidad cuando aumenta el grado de refinación, debido a que, a pesar que aumenta el área superficial de las fibras, también aumenta el área de contacto óptico entre las fibras, aumentando el área de unión de las fibras lo cual tiende a reducir la opacidad. Si se compara las pulpas con agua fría con la de agua caliente se observa que ambas no describen una tendencia similar en la lectura de la opacidad; ver figura N° 19.

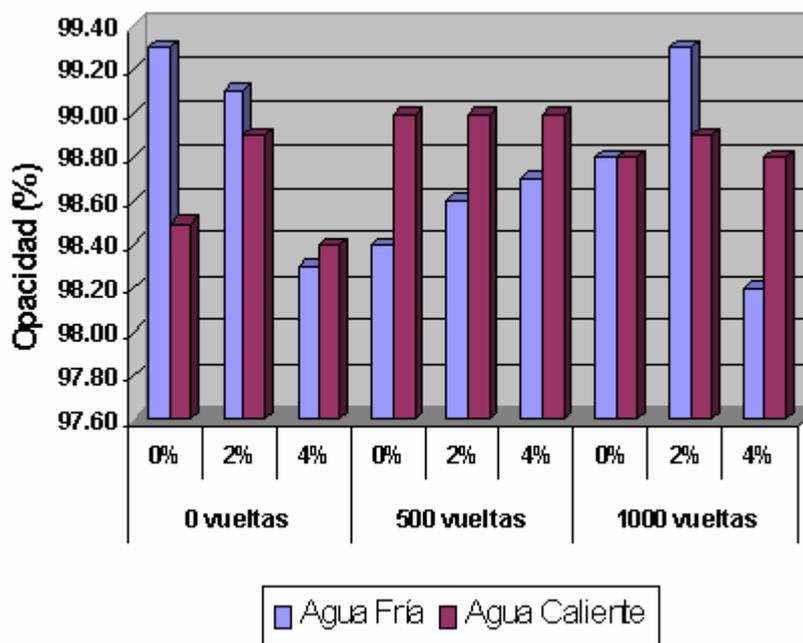


FIGURA 19: Opacidad de hojas de pulpas procesadas con agua fría y agua caliente en función de la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI.

4.8 Permeabilidad Gurley

4.8.1 Permeabilidad Gurley en la hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores de permeabilidad, expresada en segundos por cada cien centímetros cúbicos de aire, en función de las variaciones de la

concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 20, y los valores originales se muestran en el anexo 11.

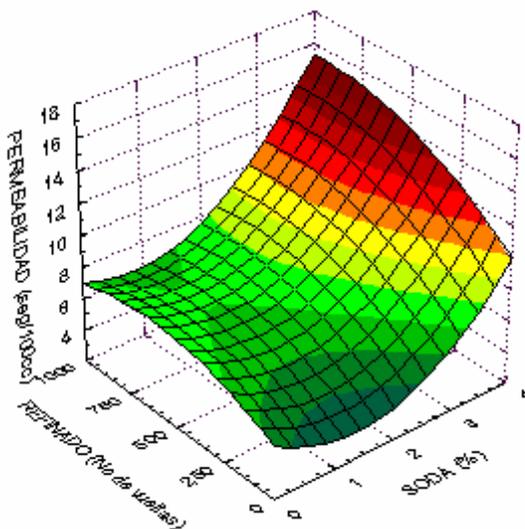


FIGURA 20: Superficie de respuesta de las variaciones de la permeabilidad en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la permeabilidad en función de las variables es:

$$\text{Permeabilidad (seg/100 cm}^3\text{)} = 6,31 + 3,24*\text{Soda} + 1,76*\text{Refinado} + 3,60*\text{Soda}^2$$

El análisis estadístico con un coeficiente de regresión del 73,3 %, indica que existe una relación cuadrática y directa, entre el reactivo y la permeabilidad con un nivel altamente significativo. En el caso del grado de refinación, la influencia sobre la permeabilidad es lineal y directa, aunque con un nivel de significancia del 90,8 %.

La permeabilidad al aire se define como la capacidad del papel para permitir el paso de un flujo de aire bajo presión, a través de una hoja de papel. Esta propiedad se relaciona con la estructura del papel que depende del número, tamaño, forma y distribución de los poros en una hoja. La refinación, produce un efecto en la permeabilidad, debido a que, en esta operación, se forman finos, y con un efecto similar al drenado, ocupando espacios vacíos dentro de la estructura de la

hoja, con capacidad de enlace con las fibras; la cantidad de finos, según la clasificación de fibras aumenta con el refinado.

4.8.2 Permeabilidad en la hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores de permeabilidad, expresada en segundos por cada cien centímetros cúbicos de aire, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 21, y los valores originales se muestran en el anexo 12.

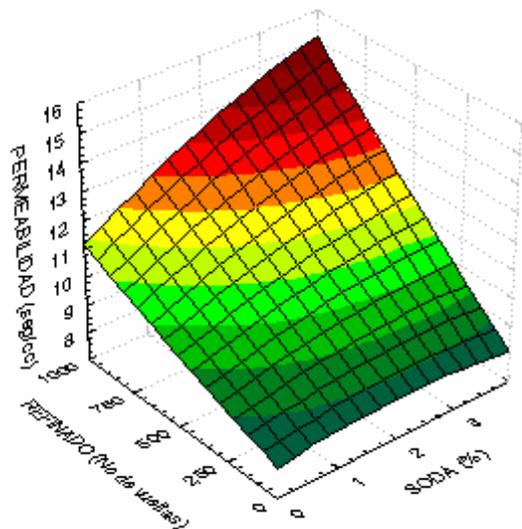


FIGURA 21: Superficie de respuesta de las variaciones de la permeabilidad en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la permeabilidad en función de las variables es:

$$\text{Permeabilidad} = 10,6911 + 0,985 \cdot \text{Soda} + 2,54 \cdot \text{Refinado}$$

Este análisis estadístico con un coeficiente de regresión del 67,5 %, indica que existe entre la concentración de soda y el grado de refinación con la permeabilidad una relación lineal y directamente proporcional. Es decir, a medida que la concentración de la soda y el grado de refinación aumenten, la permeabilidad se incrementa. Además se puede observar que la

refinación ejerce mayor influencia que la soda, con un nivel de confianza del 99,3 %. La explicación de la influencia de estos factores es similar que el caso anterior, a diferencia que en este caso la influencia del refinado es mayor que la cantidad de reactivos.

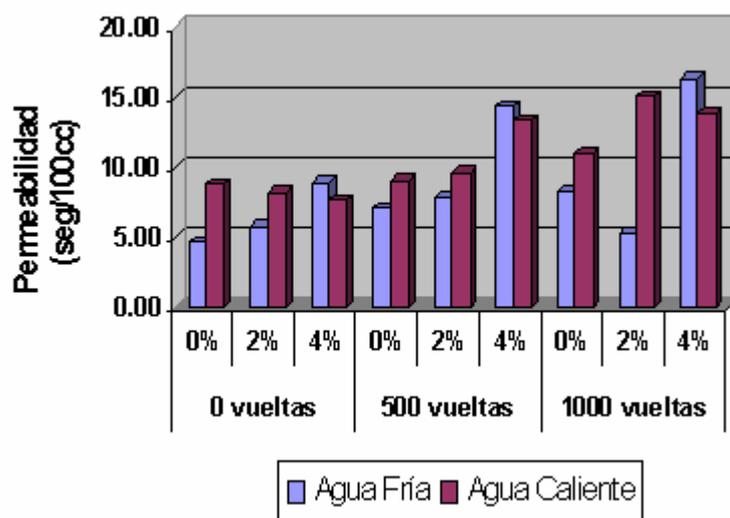


FIGURA 22: Permeabilidad de hojas de pulpas procesadas con agua fría y agua caliente en función de la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI.

Al comparar los tratamientos con agua, el aumento de temperatura del agua utilizada en el proceso de pulpeo, permite que las fibras resulten menos quebradizas y obtengan una mejor fibrilación, y como ya se explicó, la capacidad de enlace aumenta entre fibras y elementos finos, formándose un papel con una red fibrosa por el cual se hace más difícil el paso del aire. La variación por efecto del tipo de tratamiento de agua, fría o caliente, sobre la permeabilidad se observa en la figura N° 22. Como se observa en la figura, la tendencia del aumento de la permeabilidad presenta la misma tendencia conforme se va incrementando el grado de refinación.

4.10 Rasgado

4.10.1 Rasgado de hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores de rasgado, expresada en mN·m²/g, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 23, y los valores originales se muestran en el anexo 13.

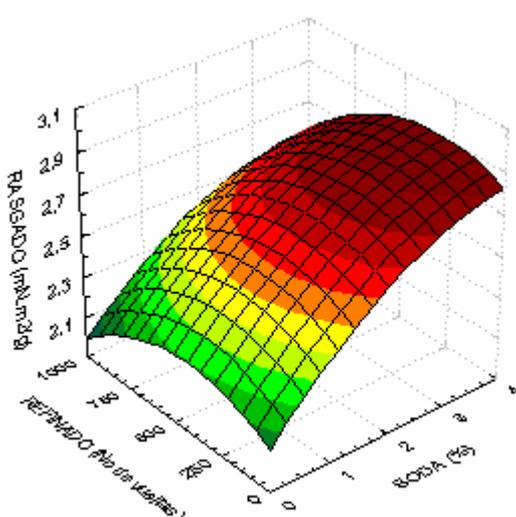


FIGURA 23: Superficie de respuesta de las variaciones del rasgado en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para el rasgado en función de las variables, con un coeficiente de regresión del 84,8 %, es:

$$\text{Rasgado} = 2,607 + 0,3217 * \text{Soda} - 0,0933 * \text{Refinado} - 0,1867 * \text{Refinado}^2$$

El análisis estadístico indica que existe una relación lineal y directa entre la concentración del reactivo y el rasgado, con un nivel de significancia del 98,8 %. Mientras que el grado de refinación, ejerce un efecto inverso y cuadrático en el rasgado, es decir, a medida que aumente el grado de refinación, los valores de rasgado disminuyen.

La resistencia al rasgado se define como el trabajo en que se incurre al separar las fibras del papel y el que se realiza al romper estas fibras. Esta propiedad se ve afectada principalmente por el largo de las fibras y el número y fuerza de las uniones entre ellas. Por ello si se aumenta la concentración del reactivo en el pre-tratamiento de la paja, las hojas resultarán con fibras con alto poder de fibrilación, y por consiguiente ofrecerá una mayor resistencia al rasgado.

En cuanto al grado de refinación, en teoría, mejora la capacidad de unión interfibrilar, y aumenta el área de contacto entre fibras; por tanto, conforme aumente el grado de refinación, la resistencia al rasgado será mayor. Sin embargo, según la ecuación de regresión, el refinado ejerce una influencia inversamente proporcional al rasgado. Esto se explica, porque al aumentar el refinado la hoja ofrece una mayor resistencia a la separación de fibras, entonces esto tiende a concentrar la resistencia al rasgado en una superficie más pequeña; la acción pasa a ser más de corte que de separación de fibras, y como la energía necesaria para romper una fibra es mucho menor que la requerida para separar fibras, los valores de resistencia al rasgado disminuyen. Asimismo, por efecto de refinado, tiende a disminuir la longitud promedio de las fibras.

4.10.2 Rasgado de hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores de rasgado, expresada en mN-m²/g, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 24, y los valores originales se muestran en el anexo 14.

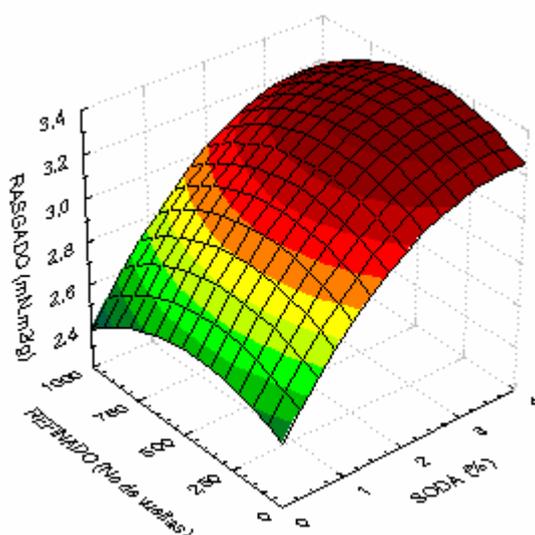


FIGURA 24: Superficie de respuesta de las variaciones del rasgado en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para el rasgado en función de las variables, con un coeficiente de regresión del 95,5 %, es:

$$\text{Rasgado} = 3,226 + 0,385*\text{Soda} - 0,2283*\text{Soda}^2 - 0,1683*\text{Refinado}^2$$

El análisis estadístico indica que existe una relación lineal y directa entre la concentración del reactivo y la resistencia al rasgado; sin embargo, se observa que este factor también tiene una relación cuadrática e inversa con el rasgado. Por otro lado, el grado de refinación muestra una relación cuadrática e inversamente proporcional con la resistencia al rasgado. Con ambos factores, el nivel de confianza es altamente significativo.

La resistencia al rasgado tiene gran importancia en la evaluación del papel que se verá sujeto a esfuerzos que lo puedan rasgar durante su uso, como por ejemplo, papel para envolturas, bolsas; en el caso de papeles para impresión es muy importante tener una alta resistencia al rasgado cuando se imprime en bobinas. Es por eso que se debe controlar el refinado hasta lograr el punto óptimo en el que el rasgado es máximo. En la figura N° 25, se muestra la tendencia que sigue el rasgado conforme va aumentando el grado refinación llegando a un punto máximo y luego procede a disminuir por las razones antes explicadas.

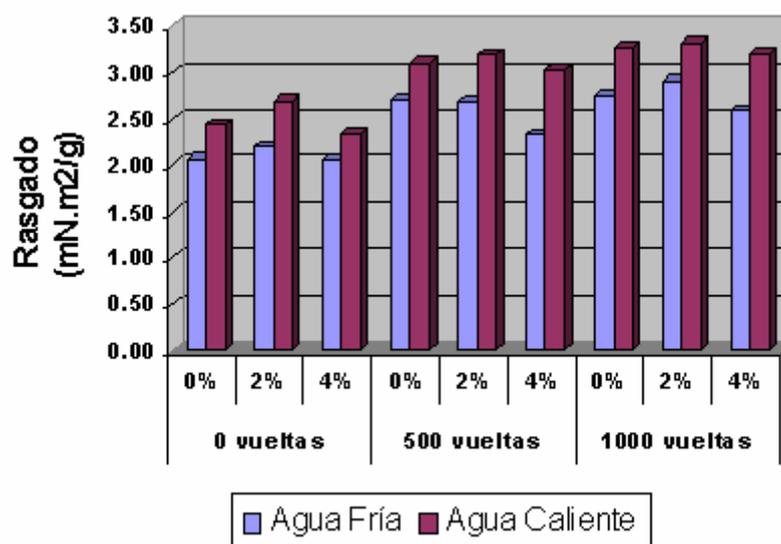


FIGURA 25: Variación del Rasgado de hojas de pulpas procesadas con agua fría y agua caliente en función la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI.

La explicación de la influencia del grado de refinación y la concentración de soda es similar al caso anterior. Asimismo, se observa en la figura N° 25, como es que los dos procesos, con agua fría y agua caliente, siguen la misma tendencia conforme va aumentando la concentración del reactivo y el grado de refinación. Sin embargo, en pulpas con agua caliente, los valores de rasgado son superiores a las hojas provenientes de pulpas con agua fría. Aparentemente, el agua caliente provoca que las fibras tenga un comportamiento más flexible y por consiguiente estas sean menos frágiles al pasar por el desfibrador, y luego presenten una mayor capacidad de fibrilación que las fibras procesadas con agua fría.

4.11 Tensión

4.11.1 Tensión en hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores de tensión, expresada en kN-m/g, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura N° 26, y los valores originales se muestran en el anexo 15.

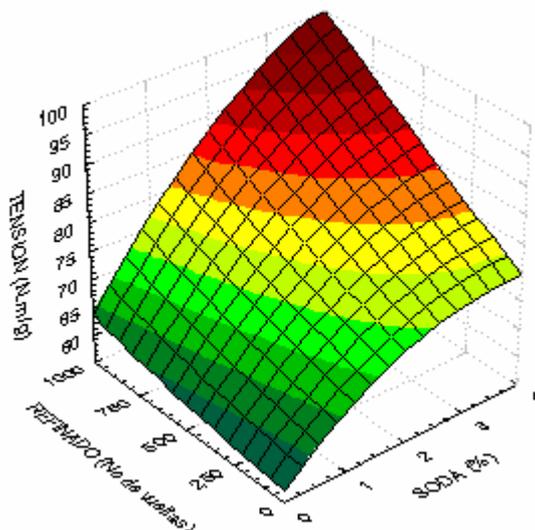


FIGURA 26: Superficie de respuesta de las variaciones de la tensión en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la tensión, con un coeficiente de regresión del 83,02 %, en función de las variables es:

$$\text{Tensión} = 75,53 + 13,66 * \text{Soda} + 8,14 * \text{Refinado}$$

El análisis estadístico indica que existe una relación lineal y directamente proporcional entre la resistencia a la tensión que ofrece la hoja de papel con la concentración del reactivo y el grado de refinación; siendo el reactivo el factor que ejerce mayor influencia en este ensayo, con un grado de significancia del 99,85 %.

La resistencia que ofrece una hoja de papel a la tensión se ve afectada principalmente por la cantidad y calidad de unión de fibras, sumada a la resistencia que ofrece la fibra, como unidad estructural, a la ruptura por efecto de la aplicación de una carga constante. Esta propiedad es importante, principalmente por los esfuerzos a los que son sometidos los papeles en sus diferentes usos, como impresión en rotativas, llenado de bolsas de papel, etc.

La soda es un factor importante para esta propiedad, debido a que al debilitar la pared celular, permite que la paja al pasar por el refinador de discos, termine en una pasta de fibras con un

alto poder de fibrilación, mayor superficie de contacto entre fibras y elementos finos que rellenen espacios vacíos y ayuden a obtener una hoja de papel lo suficientemente cohesionada que resista los esfuerzos de tensión, al los que serán sometidos.

Por otro lado, el grado de refinación ayuda también a la unión de fibras; como ya se explicó anteriormente, el refinado permite que la fibra exponga mayor superficie de contacto entre fibras, por efecto del tratamiento mecánico al que es sometida. Asimismo, la combinación del grado de refinación con la cantidad de reactivo que se use en el pre-tratamiento, permite mejorar la resistencia a la tensión del papel, debido a que cuanto mayor es la cantidad de álcali absorbido, la fibra responde mejor al refinado y se necesitaría menor energía en el refinado.

4.11.2 Tensión en hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores de tensión, expresada en kN-m/g, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura No 27, y los valores originales se muestran en el anexo 16.

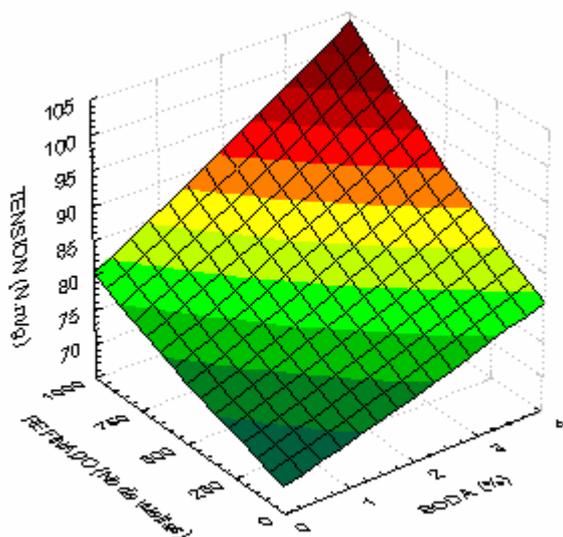


FIGURA 27: Superficie de respuesta de las variaciones de la tensión en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para la tensión en función de las variables, con un coeficiente de regresión del 94,3 %, es:

$$\text{Tensión} = 83,14 + 8,897 * \text{Soda} + 2,875 * \text{Refinado}$$

El análisis estadístico para este ensayo, indica que existe una relación lineal y directamente proporcional entre la cantidad de reactivo y el refinado con la tensión, siendo esta relación altamente significativa para ambos factores.

El incremento de la tensión es importante, dependiendo del uso final que se le va a dar al papel, en las que una alta resistencia a la tensión ayuda a resistir las roturas durante su fabricación. Si se observa la ecuación de regresión del presente ensayo, se puede notar que los factores soda y refinación ejercen influencia en la resistencia a la tensión, casi en la misma intensidad, produciendo una sinergia entre ellos, elevando los valores de la resistencia a la tensión. La explicación de cómo estos factores mejoran la resistencia a la tensión es similar al punto 4.11.1.

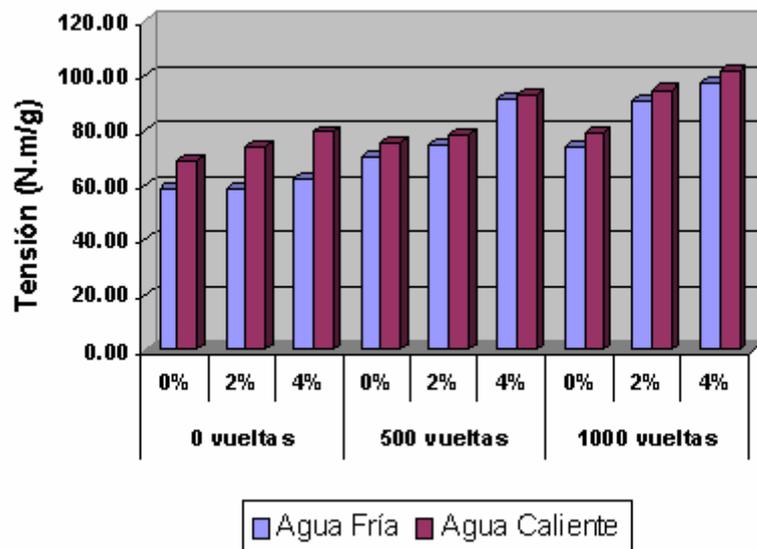


FIGURA 28: Variación de la Tensión de hojas de pulpas procesadas con agua fría y agua caliente en función la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI.

Sin embargo, al observar la figura No 28, veremos que la resistencia a la tensión es mayor en las hojas de pulpa procesada con agua caliente que en la que utilizó agua fría. Esto se puede

explicar, probablemente porque el incremento de la temperatura del agua permite que las fibras ingresen al refinador con menor probabilidad al corte, evitando así que se formen fracciones de fibra sin capacidad de unión, y favoreciendo también que las fibras tengan mayor área de fibrilación y por consiguiente exista una mayor capacidad de enlace y resultar en papeles con buena formación.

Por otro lado, también se observa que se muestra la misma tendencia en los valores de tensión, si comparamos las pulpas con agua fría y con agua caliente. Es decir, a medida que aumenta la concentración de soda, y el grado de refinación, mejora la resistencia a la tensión de los papeles; y si a esto le sumamos el incremento de la temperatura del agua, se podría decir que se puede lograr optimizar los valores de la resistencia a la tensión de los papeles formadas con las obtenidas en el presente estudio.

4.12 Reventamiento

4.12.1 Reventamiento en hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua fría

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores del reventamiento, expresada en $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura N° 29, y los valores originales se muestran en el anexo 17.

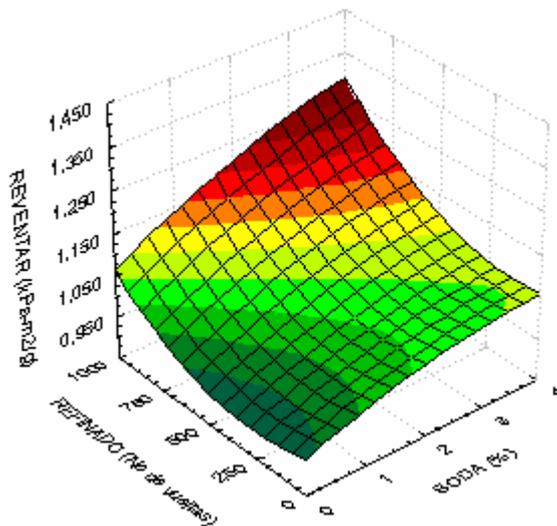


FIGURA 29: Superficie de respuesta de las variaciones del reventamiento en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para el reventamiento, con un coeficiente de regresión de 42,65 %, en función de las variables es:

$$\text{Reventamiento} = 1,072 + 0,0867 * \text{Soda} + 0,02 * \text{Refinado}$$

El análisis estadístico indica que la concentración de soda muestra una relación lineal y directamente proporcional con el reventamiento; siendo el mismo efecto ocasionado por el grado de refinación; quien ejerce mayor influencia en el valor de reventamiento es la concentración del reactivo.

Los factores que afectan al reventamiento de una hoja de papel son el largo de fibras y la unión interfibras. El reventamiento, es una propiedad interna de la hoja, que en teoría, depende del largo de fibras y de la unión interfibrilar; esta propiedad es una mezcla de la resistencia a la tensión y de la elongación permitida por la flexibilidad que pueda tener la fibra. En la ecuación de regresión, se observa que a medida que aumenta el grado de refinación y el reactivo en el pre-tratamiento, aumentan los valores de reventamiento. Lo antes mencionado se explica porque, al igual que en el caso de la tensión, la mezcla de efectos que ejercen la soda y el

refinado, produce un material fibroso con un alto poder de unión entre fibras, mejorando la formación de la hoja haciéndola resistente a los esfuerzos de reventamiento.

4.12.2 Reventamiento en hoja de ensayo obtenida de pulpa en agua caliente

La superficie de respuesta de las variaciones en los valores del reventamiento, expresada en $\text{kPa}\cdot\text{m}^2/\text{g}$, en función de las variaciones de la concentración de NaOH y el número de vueltas en el refinador PFI se muestra en la figura N° 30, y los valores originales se muestran en el anexo 18.

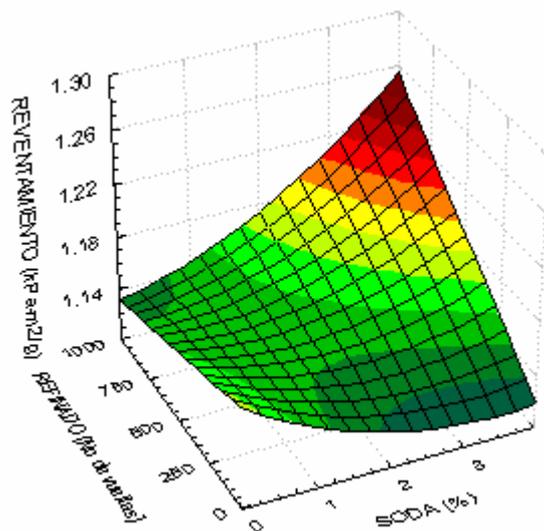


FIGURA 30: Superficie de respuesta de las variaciones del reventamiento en función de las variaciones de concentración de NaOH y número de vueltas en el refinador PFI.

La ecuación de regresión para el reventamiento, con un coeficiente de regresión del 58,5 %, en función de las variables es:

$$\begin{aligned} \text{Reventamiento} = & 1,16333 + 0,0166667*\text{Soda} + 0,023333*\text{Refinado} \\ & + 0,045*\text{Soda}*\text{Refinado} \end{aligned}$$

El análisis estadístico, indica que existe una relación lineal y directamente proporcional entre la concentración de soda y el grado de refinación con los valores de reventamiento. Asimismo, se observa un efecto combinado entre soda y refinado con resultados positivos para el reventamiento.

La explicación sobre como mejora el reventamiento, por efecto de los factores soda y grado de refinado, es similar al caso anterior. Sin embargo, tal como se puede apreciar en la figura N° 31, el aumento de la temperatura del agua mejora la resistencia al reventamiento de las hojas de papel, probablemente por el efecto ablandador del agua caliente sobre las fibras.

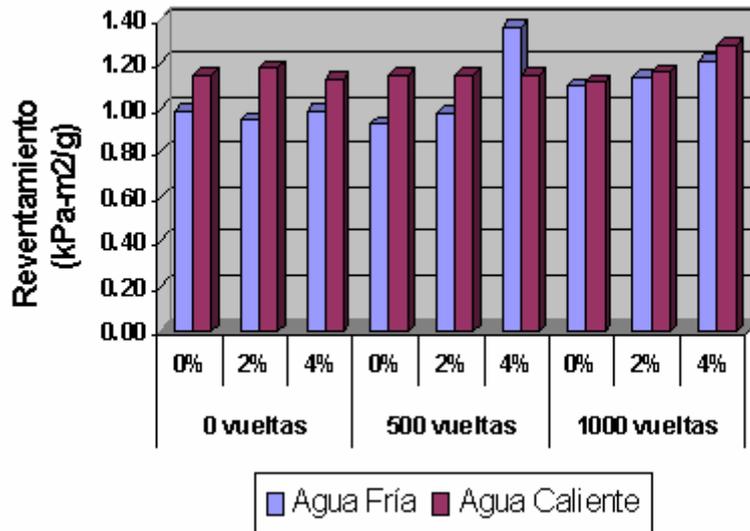


FIGURA 31: Variación del Reventamiento de hojas de pulpas procesadas con agua fría y agua caliente en función la concentración de soda y el número de vueltas en el PFI.

4.12 Ensayos de resistencia del cartón.

Luego de la realización de los ensayos de resistencia, se escogió cuatro (4) pulpas que, en general, ofrecieron mejores resultados en los ensayos de papel. Estas pulpas se utilizaron para formar hojas de cartón, con un gramaje de 145 g/m^2 , valor usual para los cartones para ondular

empleados en la fabricación de cartón corrugado. Los cartones fueron acondicionados antes de realizar los ensayos de resistencia requeridos en la industria: prueba de Cóncora (CMT) y resistencia lineal, como anillo (RCT) del cartón. Los resultados de las pruebas mencionadas se encuentran en el cuadro N° 21. En el mismo cuadro se presentan, a modo comparativo, resultados de resistencia de cartones elaborados con fibra reciclada y con fibras de bagazo de caña.

CUADRO 21: Propiedades mecánicas del corrugado medio de paja de arroz comparado con valores comerciales.

PROPIEDADES	PAJA DE ARROZ				FIBRA RECICLADA	FIBRA DE BAGAZO + RECICLADA.
	C2R5	C2R1	C4R5	C4R1	*145	*145
IT (N.m/g)	78.8	94.9	93.6	102.1	54.9	58.3
IR (kPa-m2/g)	1.15	1.16	1.15	1.28	1.39	2.03
ID (mN.m2/g)	3.19	3.33	3.04	3.2	--	--
CMT (N)	126	133	133	185	297	309
RCT(kN/m)	0.73	0.82	0.75	0.85	0.87	0.93

IT: Índice de Tensión; IR : Índice de Reventamiento; ID : Índice de Rasgado; CMT : Resistencia al aplastamiento plano de la onda corrugada; RCT : Resistencia a la compresión del borde de la hoja.

* : Valores Interpolados

En cuanto al CMT, se menciona que esta prueba es considerada predictora del grado de la calidad de una caja corrugada, el evaluar la carga que soportará la caja con el producto embalado, mientras mantenga su rigidez. Esta rigidez del cartón tiene una relación directa con el espesor en la caja de cartón corrugado, por lo que es importante que no reduzca esta dimensión por efecto del aplastamiento los rodillos corrugadores si se quiere conservar la rigidez de la capa que conforma el corrugado medio.

La resistencia a la onda, CMT, está influenciado por la proporción de fibras largas contenidas en la pulpa, las que le darán la rigidez necesaria para resistir el esfuerzo de compresión en la

onda del papel corrugado. Sin embargo, al observar el cuadro 21, se puede notar que el valor del CMT en las pulpas con el mismo pre-tratamiento químico, aumenta conforme se incrementa el grado de refinación; a pesar que el promedio de la longitud de fibras disminuya por efecto de la refinación. El aumento del valor del CMT, probablemente se deba a la fuerza de la unión de fibras (buena conformación de la hoja), y no necesariamente por la cantidad de fibra larga que esta contenga. Asimismo, se puede observar, que en el caso del cartón proveniente de pulpas con el mismo grado de refinación, se observa un aumento en el CMT a medida que aumente la concentración de soda, debido a que la soda ayuda al desfibrado de la paja de arroz, produciendo pulpa con mayor porcentaje de fibras largas. De otro lado, se puede observar que la combinación soda-refinado, mejora notablemente (en un 68 %) la resistencia a la compresión de la onda (CMT).

El RCT o compresión lineal como anillo, es una propiedad de resistencia del papel la cual está estrechamente ligada a la compresión del borde del cartón corrugado (ECT), la que a su vez indica cómo va a ser el comportamiento de las cajas durante el apilado. Es decir, la resistencia que va a ofrecer la caja durante el tiempo que esté apilado en el almacén. La medida del ECT del cartón se obtiene a partir de una fuerza paralela a las ondulaciones, y por lo que el RCT se realiza en el sentido transversal del papel.

Como se observa en el cuadro N° 21, los valores de RCT aumenta con la intensidad del refinado y de la misma manera se observa que en cartones con el mismo pre-tratamiento químico la resistencia a la compresión en el borde de la hoja aumenta al aumentar el refinado. Asimismo, al comparar cartones provenientes de pulpas con el mismo grado de refinación, se observa que hay mejoras en el valor del RCT, si se aumenta la concentración del reactivo en el pre-tratamiento químico. Con relación a lo antes mencionado, se puede afirmar que el efecto de la refinación y la concentración de soda es favorable para el desarrollo de la resistencia RCT, debido a que estos factores ayudan a la buena formación de la hoja.

Del cuadro N° 21, se comparan las propiedades de resistencia más importantes del corrugado medio de paja de arroz con valores comerciales de dos empresas en el Perú. Al tomar como referencia al índice de tensión, el corrugado medio de paja de arroz muestra valores más altos que el de los corrugados comerciales, lo que hace suponer que la calidad de la pulpa obtenida

en el presente estudio es muy buena, con mejor formación de hoja y uniones interfibrilares que los corrugados de comerciales. Así mismo, esto se puede reflejar en el valor del RCT y el Índice de reventamiento, que arroja valores que varían entre los que muestran los corrugados de fibra reciclada y bagazo.

Sin embargo, la resistencia al aplastamiento de la onda del corrugado (CMT), no alcanza los valores que exige el mercado, pero hay que tener en cuenta que la pulpa de paja de arroz no ha tenido adiciones de agentes de retención de finos en la producción de la pulpa, lo que ayudaría a darle rigidez a la onda corrugada y por consiguiente podría aumentar el valor del CMT.

5. *CONCLUSIONES*

Del presente estudio se concluye que:

1. La composición química de la paja de arroz, en lo que se refiere al contenido de celulosa y lignina es similar al de maderas latifoliadas.
2. La influencia del factor concentración de reactivo (expresado como % soda), fue positiva en el desarrollo de las propiedades de resistencia, tales como rasgado, tensión y reventar. Sin embargo a medida que aumenta la concentración de este reactivo en el pre-tratamiento de la materia prima, las propiedades ópticas del papel van disminuyendo.
3. Se encontró que el factor niveles de Refinación, mejoró notablemente las propiedades mecánicas del papel, exceptuando la resistencia al rasgado.
4. Al aumentar la temperatura del agua utilizada en el proceso de pulpeo, las fibras sufrieron menos desgaste al pasar por los discos refinadores, disminuyendo el efecto de generación de finos sin capacidad de unión y por lo tanto, mejorando las características del papel resultante.
5. En general, la combinación de los tres factores en estudio mejora las características de fibrilación, resistencia y desempeño del material fibroso en las diferentes pruebas a las que son sometidos los papeles con paja de arroz.
6. Los valores del ensayo de la prueba del Cóncora del corrugado de paja de arroz resultaron, ser menores que los exigidos por el mercado, sin embargo existen agentes químicos que ayudarían a mejorar estos resultados.

6. RECOMENDACIONES

Considerando los resultados del presente estudio, se recomienda:

- Clasificar el material, antes de proceder a darle el pre-tratamiento químico, separando los entrenudos de la paja y las hojas, quedando solo fibras de paja, con la finalidad de estudiar un material fibroso más homogéneo.
- Asimismo, con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas del papel, se recomienda realizar estudios de mezclas de pulpas a diferentes porcentajes de pulpa de la paja de arroz con pulpas de fibras no madereras que tengan mayor longitud de fibra.
- En cuanto las propiedades del corrugado medio, se recomienda adicionar a la pulpa encolantes y agentes de retención de finos, con la finalidad de mejorar la resistencia a la compresión de la onda corrugada.

BIBLIOGRAFÍA

1. Asociación de Corrugadores del Caribe, Centro y Sur América. ACCCSA. (2004). Curso de Corrugación: Analizando Cada Etapa. Lima, Perú.
2. Ali, M.; Byrd, M.; Jameel, H. (2002). Chemimechanical pulping of Cotton Stalks. 2002 TAPPI Pulping Conference Proceedings (CD version).
3. Atchison, J. (1973). Present status and future potential for utilization of Nonwood plant Fibers. A worldwide review. Non Wood Plant Fiber Pulping. Progress Report N° 4, pp. 69-81. TAPPI (USA).
4. Brandon, C. (1991). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Vol. 3. Cap. 21, pp. 321-601. Editorial LIMUSA S.A. México
5. Bryce, J.; Casey, J. (1990). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Vol. 1. Cap. 4, pp. 456-589. Editorial LIMUSA S.A. México.
6. Bublitz, W.; Casey, J. (1990). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Vol. 1. Cap. 3, pp. 151-208. Editorial LIMUSA S.A. México.
7. Correia, F.; Goel, K. (1998). Fibre Characteristics and Chemical Pulping of Canadian Industrial Hemp (*Canabis sativa* L.). TAPPI Proceedings. Pulping Conference. Book 2, pp. 761-764. Montreal, Quebec, Canada.
8. COTÉ, W. (1980). Paper Making Fibers. Co published by the Renewable Materials Institute of the State University of New York, College of Environmental Science and Forestry and Syracuse University. 79 p.

9. CHANDLER, R (1984). Arroz en los Trópicos. Guía para el Desarrollo de Programas Nacionales. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
10. De Choudens, C.; Angelier, R. (1984). XXI EUCEPA International Conference 1984, Torremolinos, Spain.
11. Escolano, J. (1979). Newsprint from Sugarcane Bagasse and other Non-Wood Plant Fibers. Non Wood Plant Fiber Pulping. Progress Report N° 10, pp. 117-121. TAPPI (USA)
12. FAO (1962). Pulp and Paper in Asia and the Far East. Vol. II. Bangkok. 611 p.
13. FAO (2003). Modelo de Suministro Mundial de Fibra. www.fao.org/forestry/include/frames/spanish.asp
14. FAO (2005). La Pasta y Papel en los Países en Desarrollo. www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=//docrep/q7885s/q7885s04.htm
15. FERNÁNDEZ, N. (2000). El Bagazo y las Fibras Anuales: Presente y Futuro para su Industrialización. Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel. La Habana, Cuba.
16. GARCEAU, J. (1989). Pâtes Mécaniques et Chimico-Mécaniques. Section technique, Association canadienne des producteurs de pâtes et papiers. Quebec-Canada.
17. Gerber, W., Sacon, V. (1992). Alternativa Tecnológica papel e papelão de palha e casca de arroz. O Papel año 53, N°5, pp. 25-34.
18. GONZALES, E. (2003). Recursos fibrosos de plantas no madereras para la industria papelera. Informe Técnico (trabajo de consultoría). s/p

19. Hale, J.; Mc Donald, R. (1969). Pulp and Paper Manufacture. The pulping of wood. Vol. 1. (USA)
20. Han, J. (1998). Properties of Non Wood Fibers. Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting. 12pp. www.fpl.fs.fed.us/documents/pdf1998/han98a.pdf
21. Hurter, R. (2002). Nonwood Fiber Content Papers – Part 1: Corrugating Medium Physical Properties. www.hurterconsult.com
22. Jacobs, R.; Pan, W.; Fuller, W.; McKean, W. (1998). Washington Wheat Straw: Variation in Fiber Properties. TAPPI Proceedings. Pulping Conference. Book 1, pp. 477-482. Montreal, Quebec, Canada.
23. Jeyasingam, J. (1998). Practical Experience on Paper Making with Non Wood Fibers. TAPPI Proceedings. Pulping Conference. Book 2, pp. 767-774. Montreal, Quebec, Canada.
24. Jiménez, L., López, F., Ferrer, J. (1993). Features of Pulp and Paper from Agricultural Residues. *Revue ATIP* vol. 47, N° 05, pp. 180-184.
25. Jiménez, L., López, F.; Sánchez, I. (1990). Caracterización de Residuos de la Tala del Olivo para la Obtención de Pastas Celulósicas. *El Papel* N° 16, Julio-Agosto, pp. 57-61.
26. Jiménez, L., López, F.; Sánchez, I. (1991). Characterization of cellulose pulp from agricultural residues. *TAPPI Journal*. Vol. 74, N° 01, pp. 217-221.

27. Jiménez, L., Maestre, F., Pérez, I., Ferrer, J. (1996). Papel de Residuos Agrícolas. El Papel N° 56, mayo-1996; pp. 41-44.
28. Kurdin, Joseph; Casey, J. (1990). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Vol. 1 cap. 4, pp 252-314. Editorial LIMUSA S.A. México
29. Libby, C. (1974). Ciencia y tecnología sobre pulpa y Papel. Tomo I. Pulpa. 2^{da} edición. Edit. Continental S.A. México. 534 p.
30. McGinnis, G.; Casey, J. (1990). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Vol. 1. Cap. 1, pp. 29-70. Editorial LIMUSA S.A. México.
31. McGovern, J.; Casey, J. (1990). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Vol. 1. Cap. 4, pp. 209-217. Editorial LIMUSA S.A. México.
32. Ministerio de Agricultura (2004). Cultivos de Importancia Nacional. Arroz. Producción Mundial. www.portalagrario.gob.pe/agricola/arroz_produccion.shtml
33. Ministerio de Agricultura (2005). Producción mensual de Arroz cáscara, según región o subregión. 2002 – 2003. www.minag.gob.pe/info_agri/cultivos/aroz.zip
34. Misra, D; Casey, J. 1990. Pulpa y Papel. Química y Tecnología Química. Vol 1. Cap. 4, pp. 602-674. Editorial Limusa. México. 950 p.
35. ROBINSON, J.; CASEY, J. (1991). Pulpa y Papel, Química y Tecnología Química. Vol. 2 Cap. 7, pp. 137-195. Editorial LIMUSA S.A. México
36. Sanjuán, R. 1997. Obtención de Pulpas y Propiedades de las Fibras para Papel. Universidad de Guadalajara. Primera edición. Guadalajara – Jalisco - México. 284p.

37. SMOOK, G. (1982). Handbook for Pulp and Paper Technologist. Québec – Canadá. 395 p.
38. SOCIEDAD PARAMONGA Ltda. (1975). Estudio de Fibras Vegetales no madera en el Perú como recurso celulósico para la producción de pulpas. Reporte técnico. Paramonga, 20 p.
39. Terziotti, L. (1975). Straw Handling and Processing. Non Wood Plant Fiber Pulping. Progress Report N° 1, pp. 85-89. TAPPI (USA).
40. TINARELLI, A. 1989. El Arroz. Versión Española por Ramón Miguel Carreres Ortelis. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid – España.
41. Xiangju, Z. (1983). Straw Pulping as Practiced in the People’s Republic of China. Progress Report N° 14, pp. 95-98. TAPPI (USA).
42. YOUNG, J.; CASEY, J. (1991). Pulpa y Papel. Química y Tecnología Química. Vol. 2. Cap. 6, pp. 25-136. Editorial LIMUSA S.A. México.
43. Zhao, X.; Odberg, L.; Risinger, G. (1992). Beating of Wheat-Straw Pulp: dissolved carbohydrates and lignins, fiber swelling, and fines generation. Tappi Journal 75 N° 1; pp. 153-161. TAPPI (USA).

ANEXO

ANEXO 01: DRENABILIDAD DE LA PULPA EN AGUA FRÍA

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	130.667	1	130.667	22.91	0.003	99.70%
Refinado	130.667	1	130.667	22.91	0.003	99.70%
Total error	34.2222	6	5.7037			
Total (corr)	295.556	8				

R-cuadrado:

88.4211%

R-cuadrado ajustado: 84.5614%

S: 2.38824

Análisis de regresión

Constante	44.7778
Soda	4.66667
Refinado	4.66667

Ecuación

$$oSR = 44.7778 + 4.66667*soda + 4.66667*refinado$$

ANEXO 02: DRENABILIDAD DE LA PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Refinado	130.667	1	130.667	21.45	0.0036	99.64%
Refinado*Soda	25	1	25	4.1	0.0892	91.08%
Total error	36.5556	6	6.09259			
Total (corr)	192.222	8				

R-cuadrado: 80.9827%

R-cuadrado ajustado: 74.6435%

S: 2.46832

Análisis de regresión

Constante	45.4444
Refinado	4.66667
Refinado*Soda	2.5

Ecuación

$$oSR = 45.4444 + 4.66667 * \text{Refinado} + 2.5 * \text{Soda} * \text{Refinado}$$

ANEXO 03: DENSIDAD DE LA PULPA EN AGUA FRÍA.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Refinado	0.000416667	1	0.000416667	2.87	0.1414	85.86%
Soda*Refinado	0.0004	1	0.0004	2.75	0.1482	85.18%
Total error	0.000872222	6	0.00014537			
Total (corr)	0.00168889	8				

R-cuadrado: 48.3553%

R-cuadrado ajustado: 31.1404%

S: 0.012057

Análisis de regresión

Constante	0.368889
Refinado	0.00833333
Soda*Refinado	-0.01

Ecuación

Densidad = 0.37222 + 0.0066667*Soda + 0.01*Refinado

ANEXO 04: DENSIDAD DE LA PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	0.000266667	1	0.000266667	3.27	0.1204	87.96%
Refinado	0.0006	1	0.0006	7.36	0.0349	96.51%
Total error	0.000488889	6	0.0000814815			
Total (corr)	0.00135556	8				

R-cuadrado: 63.9344%

R-cuadrado ajustado: 51.9126%

S: 0.00902671

Análisis de regresión

Constante	0.37
Refinado	0.00666667
Refinado*Soda	0.01

Ecuación

Densidad = 0.37222 + 0.00666667*Soda + 0.01*Refinado

ANEXO 05: ESPESOR DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA
FRÍA.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Refinado	638.602	1	638.602	15.7	0.0054	99.46%
Total error	284.738	7	40.6769			
Total (corr)	923.34	8				

R-cuadrado: 69.1621%

R-cuadrado ajustado: 64.7567%

S: 6.37784

Análisis de regresión

Constante	161
Refinado	-10.3167

Ecuación

Espesor = 161.0 -10.3167*Refinado

ANEXO 06: ESPESOR DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Refinado	121.5	1	121.5	34.96	0.002	99.80%
Soda ²	28.125	1	28.125	8.09	0.036	96.40%
Refinado ²	40.5	1	40.5	11.65	0.019	98.10%
Total error	17.375	5	3.475			
Total (corr)	207.5	8				

R-cuadrado: 91.6265 %

R-cuadrado ajustado: 86.6024 %

S: 1.86414

Análisis de regresión

Constante	157.333
Refinado	-4.5
Soda ²	3.75
Refinado ²	4.5

Ecuación

$$\text{Espesor} = 157.333 - 4.5 \cdot \text{Refinado} + 3.75 \cdot \text{soda}^2 + 4.5 \cdot \text{Refinado}^2$$

ANEXO 07: BLANCURA DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA FRÍA.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	0.8881667	1	0.881667	12.8	0.0117	98.83%
Soda ²	0.605	1	0.605	8.78	0.0252	97.48%
Total error	0.413333	6	0.0688889			
Total (corr)	1.9	8				

R-cuadrado: 78.2456

%

R-cuadrado ajustado: 70.9942 %

S: 0.262467

Análisis de regresión

Constante	30.0333
Soda	-0.983333
Soda ²	-0.55

Ecuación

B. Infinita = $30.0333 - 0.383333 \cdot \text{Soda} - 0.55 \cdot \text{Soda}^2$

ANEXO 08:

BLANCURA DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	0.666667	1	0.666667	14.89	0.0062	99.38%
Total error	0.313333	7	0.0447619			
Total (corr)	0.98	8				

R-cuadrado: 68.0272
%

R-cuadrado ajustado: 63.4597 %
S: 0.21157

Análisis de regresión

Constante	29.8667
Soda	-0.333333

Ecuación

B. Infinita = $29.8667 - 0.333333 \cdot \text{Soda}$

ANEXO 09: OPACIDAD DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA FRÍA.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	0.281667	1	0.281667	2.1	0.1979	80.21%
Soda ²	0.293889	1	0.293889	2.19	0.1898	81.02%
Total error	0.806667	6	0.134444			
Total (corr)	1.38222	8				

R-cuadrado: 41.6399

%

R-cuadrado ajustado: 22.1865 %

S: 0.366667

Análisis de regresión

Constante	99
Soda	-0.216667
Soda ²	-0.383333

Ecuación

$$\text{Opacidad} = 99.0 - 0.216667 * \text{Soda} - 0.383333 * \text{Soda}^2$$

ANEXO 10: OPACIDAD DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Refinado	0.0816667	1	0.0816667	5.14	0.0727	92.73%
Soda ²	0.0672222	1	0.0672222	4.23	0.0948	90.52%
Refinado ²	0.160556	1	0.160556	10.1	0.0246	97.54%
Total error	0.0794444	5	0.0158889			
Total (corr)	0.388889	8				

R-cuadrado: 79.5714
%

R-cuadrado ajustado: 67.3143 %

S: 0.126051

Análisis de regresión

Constante	99.1222
Refinado	0.116667
Soda ²	-0.183333
Refinado ²	-0.283333

Ecuación

$$\text{Opacidad} = 99.1222 + 0.116667 * \text{Refinado} - 0.183333 * \text{Soda}^2 - 0.283333 * \text{Refinado}^2$$

ANEXO 11: PERMEABILIDAD DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA FRÍA.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	62.9856	1	62.9856	14.67	0.0123	98.77%
Refinado	18.5856	1	18.5856	4.33	0.092	90.80%
Soda ²	25.968	1	25.968	6.05	0.0573	94.27%
Total error	21.4714	5	4.29428			
Total (corr)	129.011	8				

R-cuadrado: 83.3569 %

R-cuadrado ajustado: 73.371 %

S: 2.07226

Análisis de regresión

Constante	6.31333
Soda	3.24
Refinado	1.76
Soda ²	3.60333

Ecuación

$$\text{Permeabilidad} = 6.31333 + 3.24 \cdot \text{Soda} + 1.76 \cdot \text{Refinado} + 3.60333 \cdot \text{Soda}^2$$

ANEXO 12: PERMEABILIDAD DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	5.82135	1	5.82135	2.44	0.1694	83.06%
Refinado	38.7096	1	38.7096	16.22	0.0069	99.31%
Total error	14.3189	6	2.38649			
Total (corr)	58.8499	8				

R-cuadrado: 75.6687 %

R-cuadrado ajustado: 67.5583 %

S: 1.54483

Análisis de regresión

Constante	10.6911
Soda	0.985
Refinado	2.54

Ecuación

$$\text{Permeabilidad} = 10.6911 + 0.985 * \text{Soda} + 2.54 * \text{Refinado}$$

ANEXO 13: RASGADO DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA FRÍA.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	0.620817	1	0.620817	39.7	0.0015	99.85%
Refinado	0.05	1	0.0522667	3.34	0.1271	87.29%
Refinado ²	0.0696889	1	0.0696889	4.46	0.0885	91.15%
Total error	0.0781833	5	0.0156367			
Total (corr)	0.820956	8				

R-cuadrado: 90.4765
%

R-cuadrado ajustado: 84.7625 %

S: 0.125047

Análisis de regresión

Constante	2.60667
Soda	0.321667
Refinado	-0.0933333
Refinado ²	-0.186667

Ecuación

$$\text{Rasgado} = 2.60667 + 0.321667 * \text{Soda} - 0.0933333 * \text{Refinado} - 0.186667 * \text{Refinado}^2$$

ANEXO 14: RASGADO DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	0.88935	1	0.88935	146.3	0.0001	99.99%
Soda ²	0.104272	1	0.104272	17.15	0.009	99.10%
Refinado ²	0.0566722	1	0.0566722	9.32	0.0283	97.17%
Total error	0.0303944	5	0.00607889			
Total (corr)	1.08069	8				

R-cuadrado: 97.1875 %

R-cuadrado ajustado: 95.5 %

S: 0.0779672

Análisis de regresión

Constante	3.22556
Soda	0.385
Soda ²	-0.228333
Refinado ²	-0.168333

Ecuación

$$\text{Rasgado} = 3.22556 + 0.385 \cdot \text{Soda} - 0.228333 \cdot \text{Soda}^2 - 0.168333 \cdot \text{Refinado}^2$$

ANEXO 15: TENSIÓN DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA FRÍA.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	1119.03	1	1119.03	30.34	0.0015	99.85%
Refinado	397.56	1	397.558	10.78	0.0168	98.32%
Total error	221.273	6	36.8788			
Total (corr)	1737.86	8				

R-cuadrado: 87.2675

%

R-cuadrado ajustado: 83.0233 %

S: 6.07279

Análisis de regresión

Constante	75.5278
Soda	13.6567
Refinado	8.14

Ecuación

$$\text{Tensión} = 75.5278 + 13.6567 * \text{Soda} + 8.14 * \text{Refinado}$$

ANEXO 16: TENSION DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	474.904	1	474.904	67.9	0.0004	99.96%
Refinado	441.01	1	441.012	63.05	0.0005	99.95%
Soda*Refinado	33.06	1	33.0625	4.73	0.0817	91.83%
Total error	34.9724	5	6.99447			
Total (corr)	983.951	8				

R-cuadrado: 96.4457 %

R-cuadrado ajustado: 94.3132 %

S: 2.64471

Análisis de regresión

Constante	83.14
Soda	8.89667
Refinado	8.57333
Soda*Refinado	2.875

Ecuación

$$\text{Tensión} = 83.14 + 8.89667 * \text{Soda} + 8.57333 * \text{Refinado} + 2.875 * \text{Soda} * \text{Refinado}$$

ANEXO 17: REVENTAMIENTO DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA FRÍA.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	0.0450667	1	0.0450667	3.83	0.0983	90.17%
Refinado	0.05	1	0.0486	4.13	0.0885	91.15%
Total error	0.0706889	6	0.0117815			
Total (corr)	0.164356	8				

R-cuadrado: 56.9903 %

R-cuadrado ajustado: 42.6537 %

S: 0.108543

Análisis de regresión

Constante	1.07222
Soda	0.0866667
Refinado	0.09

Ecuación

$$\text{Reventamiento} = 1.07222 + 0.0866667 \cdot \text{Soda} + 0.02 \cdot \text{Refinado}$$

ANEXO 18: REVENTAMIENTO DE HOJA DE ENSAYO DE PULPA EN AGUA CALIENTE.

Análisis de variancia

Predictor	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón F	Valor P	Significancia
Soda	0.00166667	1	0.00166667	1.82	0.2347	76.53%
Refinado	0.00	1	0.00326667	3.58	0.1172	88.28%
Soda*Refinado	0.0081	1	0.0081	8.87	0.0309	96.91%
Total error	0.00456667	5	0.000913333			
Total (cor)	0.0176	8				

R-cuadrado: 74.053 %

R-cuadrado ajustado: 58.4848 %

S: 0.0302214

Análisis de regresión

Constante	1.16333
Soda	0.0166667
Refinado	0.0233333
Soda*Refinado	0.045

Ecuación

Reventamiento = 1.16333 + 0.0166667*Soda + 0.0233333*Refinado + 0.045*Soda*Refinado.

ANEXO 19: VALORES ORIGINALES DE ENSAYOS

ENSAYOS CON AGUA FRIA

CODIGO	Gramaje seco (g/m ²)	Espesor (µm)	Densidad (g/cm ³)	Blancura (%)	Opacidad (%)	Permeabilidad Gurley (s/100cm ³)	Tensión (kN-m/g)	Rasgado (mN-m ² /g)	Reventamiento (kPa-m ² /g)	Longitud de rotura (m)
A1B1C1	59.07	173.50	0.34	31.80	99.30	4.64	58.95	2.07	0.99	601
A2B1C1	63.08	172.30	0.37	31.10	99.10	5.80	70.12	2.71	0.93	715
A3B1C1	60.42	162.40	0.37	30.00	98.30	8.88	73.96	2.76	1.10	754
A1B1C2	61.66	168.70	0.37	30.70	98.40	7.10	58.91	2.21	0.95	601
A2B1C2	60.05	158.60	0.38	31.00	98.60	7.85	74.74	2.69	0.98	762
A3B1C2	60.39	167.20	0.36	30.20	98.70	14.29	91.20	2.92	1.14	930
A1B1C3	59.35	154.10	0.39	31.10	98.80	8.29	62.64	2.06	0.99	639
A2B1C3	50.38	141.50	0.36	31.00	99.30	5.29	91.95	2.33	1.36	938
A3B1C3	56.75	150.70	0.38	30.20	98.20	16.30	97.28	2.59	1.21	992

ENSAYOS CON AGUA CALIENTE

CODIGO	Gramaje seco (g/m ²)	Espesor (µm)	Densidad (g/cm ³)	Blancura (%)	Opacidad (%)	Permeabilidad Gurley (s/100cm ³)	Tensión (kN-m/g)	Rasgado (mN-m ² /g)	Reventamiento (kPa-m ² /g)	Longitud de rotura (m)
A1B2C1	59.64	170.00	0.35	31.00	98.50	8.78	69.02	2.46	1.15	704
A2B2C1	59.90	164.50	0.37	30.70	98.90	8.18	75.81	3.11	1.15	773
A3B2C1	61.32	172.00	0.36	30.40	98.40	7.60	79.58	3.28	1.12	812
A1B2C2	58.13	161.00	0.36	30.30	99.00	9.02	74.18	2.70	1.18	756
A2B2C2	59.88	159.50	0.38	30.60	99.00	9.55	78.88	3.19	1.15	804
A3B2C2	61.73	159.00	0.39	30.20	99.00	13.29	94.94	3.33	1.16	968
A1B2C3	60.62	160.50	0.38	31.10	98.80	10.98	80.07	2.34	1.13	817
A2B2C3	59.64	157.00	0.38	30.10	98.90	15.02	93.65	3.04	1.15	955
A3B2C3	61.34	162.00	0.38	30.50	98.80	13.80	102.13	3.20	1.28	1042