

**Universidad Nacional de Misiones. Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales. Secretaría de Investigación y Postgrado. Maestrías en Madera, Celulosa y Papel**

*Maestrando*  
**José Posluszny**

## **Efecto de la Mezcla de Papeles reciclados sobre las propiedades de las pulpas**

**Tesis de Maestría presentada para obtener el título de “Magíster en Ciencias de la Madera, Celulosa y Papel”  
OCyP**

*Director*  
**Ing. Luis Delfederico**

*Co-Directora*  
**Ing. Graciela Beatriz Gavazzo**

**Posadas, 1998**



Esta obra está licenciada bajo Licencia Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES**

**EFFECTO DE LA MEZCLA DE PAPELES RECICLADOS  
SOBRE LAS PROPIEDADES DE LAS PULPAS**

**JOSE ANTONIO POSLUSZNY**

**Tesis presentada a la  
Universidad Nacional de  
Misiones como exigencia  
parcial de la Maestría en  
Ciencias de la Madera,  
Celulosa y Papel.**

**Director: Delfederico, Luis E., MIQ., Ing.**

**Codirector: Gavazzo, Graciela B., MScA., Ing.**

**Octubre de 1998**

*A Mabel, Mariano,  
Guillermo y Ailín; mi esposa  
y mis hijos respectivamente  
y a mis padres, a todos ellos  
mi gratitud por el apoyo, y la  
paciencia brindada*

## **RECONOCIMIENTOS.**

No puedo dejar de expresar mi reconocimiento a mi director de tesis MIQ., Luis Delfederico por sus consejos para el abordaje de cada uno de los aspectos del trabajo.

Un especial reconocimiento a MScA., Graciela Gavazzo, por todo el apoyo brindado.

Mi reconocimiento al Ing. Eduardo Perrone e Ing. Horacio Muñoz, autoridades de la Facultad de Ingeniería, por contribuir en la construcción del pulper, y a los Ingenieros Lucio Posluszny y Eugenio Cruz.

A quién en vida fue José Portel, por toda la colaboración brindada en el desarrollo del trabajo experimental.

Un reconocimiento particular a: Carlos E. Nuñez, Claudio Pavlik, Fernando Felissia, María Vallejos y Martha Begué.

## RESUMEN.

De la búsqueda bibliográfica realizada con referencia al reciclado, se desprende que muy pocos son trabajos en los que se contemplan mezclas de pulpas, y prácticamente no hay antecedentes de la evaluación de mezclas de papeles recuperados. Sobre la base de estas consideraciones, se plantea el presente trabajo que tiene por objetivo: *“evaluar la influencia de la mezcla de papeles reciclados sobre las propiedades de las pastas”*. Para alcanzar los objetivos propuestos se estudiaron mezclas de papeles de diarios usados (ONP) con cartones corrugados usados (OCC), estos últimos refinados a niveles que permitieran analizar el efecto de esta operación y la mezcla sobre propiedades estructurales, mecánicas y ópticas de las pastas. Se eliminaron los finos que pasan el tamiz de mesh 150 durante la operación de depuración de las pulpas de ONP y OCC, tomadas como materia prima para el estudio, no obstante en todas las operaciones siguientes siempre las pulpas fueron retenidas en tamiz de mesh 270. El desarrollo experimental se llevó a cabo mediante un diseño experimental para dos factores a cinco niveles (Central Composite Design: CCD), con un total de 11 experiencias, de las cuales tres son repeticiones en el punto central para la determinación del error puro. Uno de los factores corresponde al porcentaje de ONP en la mezcla ONP-OCC, mientras que el otro lo constituye el nivel o grado de refino del OCC. En consecuencia, las pulpas de cartones corrugados usados en las mezclas se refinaron a cinco niveles en una Pila Holandesa. Con las pulpas de ONP y OCC refinadas se procedió a preparar cada una de las mezclas en las proporciones establecidas por el diseño experimental. Con cada una de las once mezclas ONP-OCC, se realizaron los ensayos de drenabilidad de acuerdo a Norma SCAN, y grado de retención de agua, como así también se confeccionaron las hojitas con recirculación de agua de acuerdo a Normas TAPPI. Las hojitas de 1,2 gramos ( $60 \text{ gr/m}^2$ ) se ensayaron para la determinación de las propiedades de densidad, resistencias a la explosión, tracción y rasgado, permeabilidad al aire y propiedades ópticas de: opacidad, blanco y coeficiente de dispersión de la luz. Con las hojitas de 2,4 gramos ( $120 \text{ gr/m}^2$ ) se realizó el ensayo de compresión. Los ensayos se realizaron de acuerdo a Normas TAPPI e ISO, y las lecturas se procesaron estadísticamente. Los valores medios de cada una de las

propiedades para cada una de las mezclas fueron analizados con la ayuda del programa de computación STATGRAPHICS Plus 7.0. Los resultados a los que se ha arribado indican que tanto el porcentaje de ONP en la mezcla como el grado de refino del OCC tienen influencia significativa al 95 % de confiabilidad sobre todas las propiedades, a excepción de la opacidad. El incremento en el porcentaje de ONP en la mezcla ONP-OCC contribuye aumentando las propiedades: Blanco y Coeficiente de Dispersión de la Luz; y afecta disminuyendo las propiedades: Grado de refino de la mezcla, Densidad, Grado de Retención de Agua y propiedades resistentes. Para la Permeabilidad al aire, el porcentaje de ONP en la mezcla incrementa los tiempos a bajos niveles de refino del OCC, mientras que a altos niveles de refino del OCC los tiempos caen con el aumento de ONP en la mezcla. Por otra parte, el aumento en el nivel de refino del OCC, contribuye solamente en la reducción del Blanco y Resistencia al Rasgado, influyendo positivamente sobre las demás propiedades estudiadas, a excepción del Coeficiente de Dispersión de la Luz, donde la propiedad no se ve afectada por el nivel de refino del OCC.

---

## CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
CONTENIDO	iv
LISTA DE TABLAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS	xi
<b>CAPITULO 1 INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>CAPITULO 2 REVISION BIBLIOGRAFICA</b>	<b>4</b>
2.1 <b>LA INDUSTRIA DE LA PULPA Y EL PAPEL</b>	<b>4</b>
2.1.1    El papel de desperdicio en los principales países de Latino América	4
2.1.2    La industria de la pulpa y papel en Argentina	5
2.2 <b>EL RECICLADO DEL PAPEL</b>	<b>8</b>
2.2.1    Introducción	8
2.2.2    Concepto de reciclado	14
2.2.3    Diseño para el medio ambiente	16
2.2.4    El reciclado en el ciclo productivo del papel	19
2.2.5    Beneficios de reciclar papeles y cartones	21
2.2.6    Desarrollo y sustentabilidad	23
2.2.7    Ciclo sustentable del papel	27
2.3 <b>TECNOLOGIA DEL RECICLADO DEL PAPEL</b>	<b>32</b>
2.3.1    Introducción	32
2.3.2    El proceso de pulpado	33
2.3.3    Usos de los papeles de desperdicios	36
2.3.3.1    Usos no papeleros	36
2.3.3.2    Usos papeleros	37
2.4 <b>EFFECTOS DEL RECICLADO SOBRE LAS PROPIEDADES</b>	<b>38</b>
2.4.1    Introducción	38

2.4.2	Propiedades	41
2.4.2.1	Densidad	41
2.4.2.2	Grado de refino	43
2.4.2.3	Grado de Retención de agua	45
2.4.2.4	Porosidad	49
2.4.2.5	Resistencia a la Tracción	50
2.4.2.6	Resistencia a la Explosión	53
2.4.2.7	Resistencia al Rasgado	54
2.4.2.8	Resistencia a la Compresión	55
2.4.2.9	Propiedades ópticas	57
<b>CAPITULO 3 EXPERIMENTAL</b>		<b>60</b>
3.1	PLAN DE TRABAJO	60
3.2	MATERIAS PRIMAS	60
3.3	PULPER	61
3.3.1	Diseño y construcción	61
3.3.2	Ensayos preliminaes	62
3.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	64
3.5	OBTENCION DE PULPAS	66
3.5.1	Pulpado de ONP	66
3.5.2	Pulpado de OCC	66
3.5.3	Depuración de pastas	67
3.6	REFINADO DEL OCC	68
3.7	OBTENCION DE LAS MEZCLAS	69
3.8	ENSAYOS DE LAS PULPAS	70
3.8.1	Longitud de fibras	70
3.8.2	Grado de refino de la mezcla	70
3.8.3	Grado de retención de agua	71
3.8.4	Confección de las hojitas	72
3.8.5	Ensayos Físico-Mecánicos y ópticos	73
3.8.5.1	Gramaje	73
3.8.5.2	Espesor	73

3.8.5.3	Densidad	74
3.8.5.4	Permeabilidad del aire	74
3.8.5.5	Indice de Tracción	74
3.8.5.6	Indice de Explosión	75
3.8.5.7	Indice de Rasgado	75
3.8.5.8	Resistencia a la Compresión	76
3.8.5.9	Propiedades Opticas	76
3.8.6	Observación microscópica	76
3.9	PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	72
<b>CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSION</b>		<b>78</b>
4.1	COMPOSICION DEL ONP Y OCC	78
4.2	PROPIEDADES DE LAS PULPAS	82
4.2.1	Clasificación de fibras	82
4.2.2	Propiedades de las pulpas de ONP y OCC	83
4.3	PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS	84
4.4	DISCUSION DE RESULTADOS	86
4.4.1	Introducción	86
4.4.2	Densidad	87
4.4.3	Grado de refino de la mezcla	88
4.4.4	Grado de retención de agua	88
4.4.5	Permeabilidad al aire	89
4.4.6	Resistencia a la Tracción	91
4.4.7	Resistencia a la Explosión	92
4.4.8	Resistencia al Rasgado	93
4.4.9	Compresión (STFI)	95
4.4.10	Opacidad	96
4.4.11	Blanco	97
4.4.12	Coefficiente de dispersión de la luz	97
<b>CAPITULO 5 CONCLUSIONES</b>		<b>100</b>
BIBLIOGRAFIA		101
ANEXO I A	Pulper	111

ANEXO I B	Rotor	112
ANEXO II	Clasificación de fibras de ONP y OCC refinados	113
ANEXO III A	Propiedades Mezcla 25%ONP-75%OCC °SR 28	115
ANEXO III B	Propiedades Mezcla 75%ONP-25%OCC °SR 28	117
ANEXO III C	Propiedades Mezcla 25%ONP-75%OCC °SR 72	119
ANEXO III D	Propiedades Mezcla 75%ONP-25%OCC °SR 72	121
ANEXO III E	Propiedades Mezcla 15%ONP-85%OCC °SR 50	123
ANEXO III F	Propiedades Mezcla 85%ONP-15%OCC °SR 50	125
ANEXO III G	Propiedades Mezcla 50%ONP-50%OCC °SR 19	127
ANEXO III H	Propiedades Mezcla 50%ONP-50%OCC °SR 81	129
ANEXO III I	Propiedades Mezcla 50%ONP-50%OCC °SR 50	131
ANEXO III J	Propiedades Mezcla 50%ONP-50%OCC °SR 50	133
ANEXO III K	Propiedades Mezcla 50%ONP-50%OCC °SR 50	135
ANEXO IV	ANOVA y coeficientes de regresión para las propiedades	136
ANEXO V	Coeficientes de correlación	140
ANEXO VI	Trabajo presentado al 31° Congreso Anual de Celulosa y Papel de la ABCTP, San Pablo, Brasil, 19 al 23 de octubre de 1998	141

## LISTA DE TABLAS

2.1	Importaciones y exportaciones de papel de desperdicio en países de Latino América para el año 1996	5
2.2	Material Reciclable contenido en los residuos de diferentes ciudades del mundo	11
2.3	Relación entre productos de fibras secundarias y su fuente de papel	37
3.1	Componentes del diseño CCD para dos factores	65
3.2	Diseño experimental CCD para dos factores	65
3.3	Condiciones de pulpado de ONP	66
3.4	Condiciones de pulpado de OCC	67
3.5	Valor del °SR, tiempo de refinado y sequedad para cada una de las pastas refinadas	69
4.1	Propiedades de las pulpas de ONP y OCC	84
4.2	Tabla resumen de valores de las propiedades	85
4.3	Coefficientes de regresión	86

## LISTA DE FIGURAS

2.1	El papel de desperdicio en países de Latino América para el año 1996	4
2.1	Producción, importación y exportación de papeles y cartones para 1996	5
2.2	Distribución de la producción, importación y exportación de papeles y Cartones por tipos para el año 1996	7
2.3	contribución del papel de desperdicio en la fabricación de corrugados en la Argentina para el año 1996	7
2.5	El papel de desperdicio en la Argentina	8
2.6	Participación de los distintos componentes en la basura reciclable	12
2.7	Símbolo de reciclado y reciclable	14
2.8	Esquema de las tres erres (RRR)	15
2.9	Eco-etiquetas	18
2.10	Logotipos usados en cartones corrugados	19
2.11	El reciclado en el ciclo productivo del papel	19
2.12	Reciclado del papel	21
2.13	Balance de materia en el ciclo productivo	27
2.14	Ciclo sostenible del papel	28
2.15	Esquema simplificado del reciclado del papel	32
2.16	Pulper o hidrapulper	34
2.17	Pulper para alta consistencia discontinuo	35
2.18	Distribución de equipos en un sistema de repulpeo	36
2.19	Efecto del número de ciclos de reciclado sobre la longitud de rotura y densidad	38
2.20	Curva típica de refinado	43
2.21	Variación del módulo de elasticidad con el rendimiento de la pulpa	45
2.22	Modelo adoptado para explicar hinchamiento y hornificación	47
2.23	Variación del PSF con el rendimiento de la pulpa	48
2.24	Resistencia al tracción en función de la densidad durante el reciclado para pastas mecánicas	52

2.25	Resistencia a la tracción en función de la densidad durante el reciclado para pastas químicas batidas	52
2.26	Indice de Compresión	57
3.1	Pulper	63
3.2	Diseño central compuesto para dos factores	64
4.1	Fibras de pulpa de ONP (4x)	80
4.2	Fibras de pulpa depurada de ONP (4x)	80
4.3	Fibras de pulpa depurada de OCC °SR 17 (4x)	81
4.4	Fibras de pulpa depurada de OCC refinada a °SR 81 (4x)	81
4.5	Traqueida de OCC refinada a °SR 81 (40x)	82
4.6	Distribución de la clasificación de fibras	83
4.7	Superficie de respuesta para Densidad	87
4.8	Superficie de respuesta para Grado de refinado de la mezcla	89
4.9	Superficie de respuesta para Grado de retención de agua	90
4.10	Superficie de respuesta para Permeabilidad al aire	91
4.11	Superficie de respuesta para Resistencia a la Tracción	92
4.12	Correlación entre Densidad y Resistencias a la Tracción y Explosión	93
4.13	Superficie de respuesta para Resistencia a la Explosión	94
4.14	Superficie de respuesta para Resistencia al Rasgado	95
4.15	Superficie de respuesta para resistencia a la Compresión (STFI)	96
4.16	Correlación de STFI con Densidad y Grado de retención de agua	97
4.17	Superficie de respuesta para Blanco	98
4.18	Superficie de respuesta para Coeficiente de Dispersión de la Luz	99

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.

- °SR: Grado Shopper-Riegler.
- ACPP: Asociación Canadiense de Pastas y Papeles.
- ANOVA: Análisis de variancia.
- CEAMSE: Coordinación Ecológica Area Metropolitana Sociedad del Estado.
- cm: Centímetro.
- CM: Dirección transversal.
- Coef.: Coeficiente.
- CP: Pulpa química.
- CTMP: Pastas quimitemomecánicas.
- DFE: Diseño para el medio ambiente.
- DI: Destintado.
- DIP: Desarrollo integral de productos.
- Disp.: Dispersión.
- Ed. Edición.
- etc.: etcétera.
- F.I.: Facultad de Ingeniería.
- FCEQyN: Facultad de Ciencias Exactas Químicas y Naturales.
- G. : Grado
- gr.: Gramo.
- lts: Litros.
- m: Metro.
- Mat. Org.: Material orgánico.
- MD: dirección de máquina.
- N.A.: No aplicable.
- N: Newton.
- OCC: cajas de cartones corrugados usados.
- ONP: diarios usados.
- P/S: sustitutos de la pulpa.
- Pa: Pascal.
- PROCyP: Programa de Investigación en Celulosa y Papel.

PSF: Punto de saturación de la Fibra.

rpm: Revoluciones por minuto.

S/D: Sin datos.

SGW: pulpa mecánica a la piedra.

STFI: Test de compresión en tramo corto.

Symp.: Simposio.

TAPPI: Asociación Técnica de la Industria de la Pulpa y el Papel.

TMP: Pastas termomecánicas.

ton: Tonelada.

UNaM: Universidad Nacional de Misiones.

Vol.: Volumen.

WRV: Grado de retención de Agua.

## **CAPITULO 1**

### **INTRODUCCION**

El reciclado es uno de los aspectos que da a lugar a una de las mayores discusiones en nuestros días. Tanto los políticos como las agrupaciones mediambientalistas dedican una buena parte de su tiempo para generar posiciones marcadas referentes al tema. Se podría definir al reciclaje como la separación, recuperación, procesamiento y reutilización de productos y materiales obsoletos o de subproductos industriales (1).

En tal sentido, el concepto de diseño para el medio ambiente (DFE) se perfiló por el año 1992 como consecuencia de empresas que asumieron la incorporación de una concienciación medioambiental en el desarrollo de sus productos. El diseño para el medio ambiente se define aquí como una consideración sistemática de la función de diseño con respecto a objetivos medioambientales, de salud y seguridad a lo largo del ciclo de vida completo del producto y del proceso (1).

Por otra parte, el desarrollo sostenible representa el progreso industrial por el cual se satisfacen las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades (1).

El DFE agrupa una variedad de disciplinas que se solapan entre sí, tales como: Salud, Integridad ecológica y protección de los recursos, Consumo de energía, Reducción de los residuos, Reciclaje y reutilización (1).

El reciclado del papel no es nuevo, y tiene aspectos que están íntimamente relacionados a las cuestiones enunciadas anteriormente. A comienzos y mediados del Siglo XVIII la producción de papel provenía de fibras textiles, en consecuencia el

reciclado se constituía en una necesidad económica debido a los altos costos de la materia prima. A medida que fue transcurriendo el tiempo la demanda de papeles fue creciendo, dando lugar al desarrollo de papeles modernos producidos a partir del uso de fibras agrícolas y madera. Este desarrollo acompañado con una reducción en los precios ha permitido la expansión del uso de papeles con distintos fines descartables tales como periódicos, envoltorios y embalajes entre otros. Esta situación da lugar a un nuevo producto: el papel de desperdicio.

El papel de desperdicio tiene un impacto negativo por volumen inicial sobre el medio ambiente, que es atenuado por biodegradabilidad. El reciclado también ayuda a resolver en parte los problemas que ocasionan el papel de desperdicio. Si bien todos los aspectos tecnológicos del reciclado no están totalmente resueltos hasta el momento, se puede afirmar que a pesar de los 300 años de historia el tema promete fortalecerse y hacerse cada vez más imprescindible para la industria y la sociedad.

Existen buenas razones para reciclar papel, las que pueden resumirse en la protección del recurso forestal, reducción de la cantidad de basura con la consiguiente reducción de los costos de tratamiento de las mismas, y por último la contribución a la instauración dentro de la sociedad de una conciencia ecológica (2).

El contenido de papeles y cartones en los residuos urbanos por lo general es significativo y representa un 18 % para la ciudad de Buenos Aires (3), razón por la cual su reciclado es atractivo y practicada en muchos lugares (4, 5, 6).

En tal sentido, existen estudios sobre el comportamiento de las fibras y las modificaciones de las propiedades físicas y ópticas debidas al reciclado (7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15).

Por otra parte, numerosos estudios realizados a partir del reciclado de cartones corrugados usados (OCC) indican la importancia de refinar las pulpas a los efectos de mejorar las propiedades de las mismas (16, 17, 18, 19).

De la búsqueda bibliográfica realizada, se desprende que la mayoría de los estudios de reciclado parten de una pulpa virgen y estudian su comportamiento a través de distintos ciclos sucesivos de reciclado, muy pocos son los que contemplan el estudio de mezclas, y prácticamente no hay antecedentes de la evaluación de mezclas de papeles recuperados. Sobre la base de estas consideraciones, se plantea el presente trabajo que tiene el siguiente objetivo: ***“evaluar la influencia de la mezcla de papeles reciclados sobre las propiedades de las pastas”***.

Considerando que los papeles de diario y cartones corrugados usados son los que se encuentran en mayor proporción dentro de la totalidad de los papeles presentes en la basura de los grandes centros urbanos; se decide que los objetivos previstos se logren utilizando mezclas de papeles de diarios usados (ONP) con cartones corrugados usados (OCC), estos últimos refinados a niveles que permitieron analizar el efecto de esta operación y la mezcla sobre propiedades estructurales, mecánicas y ópticas de las pastas.

Por otra parte, se ha tomado la decisión de eliminar los finos que pasan el tamiz de mesh 150 durante la operación de depuración de las pulpas de ONP y OCC, tomadas como materia prima para el estudio. En todas las operaciones realizadas a posteriori siempre las pulpas se retuvieron en tamiz de mesh 270. La eliminación de los finos en la primer etapa obedece a que durante las experiencias preliminares se determinó que las pulpas con los finos presentaban valores de drenabilidad altos en la escala Shoper-Riegler, lo cual probablemente solaparía el estudio del efecto del refinado del OCC y sus mezclas con ONP.

Además, la eliminación de los finos puede considerarse que no es una traba en los procesos industriales de reciclado de papeles y cartones, puesto que existen experiencias en las cuales la incineración de los residuos para la generación energía es una realidad puesta en práctica.

---

## CAPITULO 2

### REVISION BIBLIOGRAFICA.

#### 2.1 LA INDUSTRIA DE LA PULPA Y EL PAPEL.

##### 2.1.1 El papel de desperdicio en los principales países de Latino América.

En la figura 2.1 se presentan valores de recuperación y consumo de papel de desperdicio para los principales países latinoamericanos para el año 1996, se observa claramente la importancia de la actividad en Brasil, Argentina y México, siendo menor la misma en Venezuela, Perú, Chile, Uruguay y Cuba (20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27).

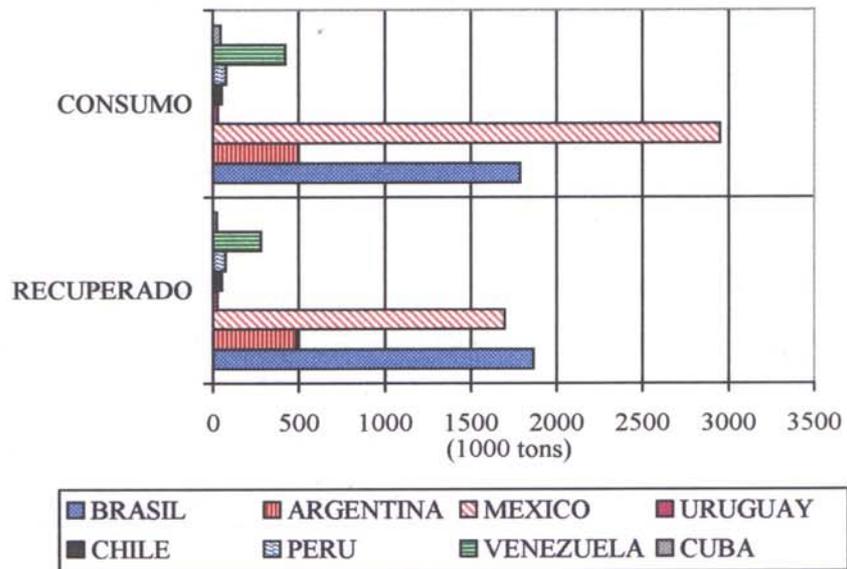


Figura 2.1. El papel de desperdicio en países de Latino América para el año 1996.

La información estadística sobre importación y exportación de papeles de desperdicio para los países presentados anteriormente señalan que en la mayoría de los casos las importaciones son superiores a las exportaciones para el mismo año, esta situación se presenta en la tabla 2.1.

Por otra parte, los datos estadísticos indican que para los países analizados se registran respecto al año 1995 importantes incrementos en lo que hace a la recuperación y consumo de papeles de desperdicio frente a una ligera merma en las importaciones a excepción de México. En cuanto a las exportaciones se registra muy poca variación para dicho período; lo cual da la pauta que el futuro para las actividades relacionadas al papel de desperdicio es altamente promisorio.

**Tabla 2.1. Importaciones y exportaciones de papel de desperdicio en países de Latino América para el año 1996.**

<i>PAIS</i>	<i>IMPORTACION (1000 ton)</i>	<i>EXPORTACION (1000 ton)</i>
BRASIL	29	5
ARGENTINA	16	3
MEXICO	1255	S/D
URUGUAY	6	3
PERU	6	S/D
VENEZUELA	142	S/D
CUBA	22	S/D

### **2.1.2 La industria de la pulpa y papel en la Argentina.**

Se presentan a continuación datos estadísticos correspondientes a papeles y cartones para la República Argentina (21).

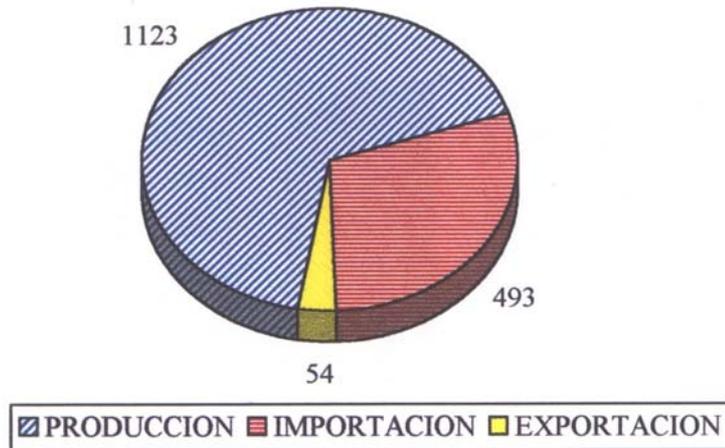
El consumo aparente para el año 1996 ha registrado un incremento del orden del 11,4% respecto al año anterior que se traduce en un consumo aparente per cápita de 44,9 kg. El incremento más pronunciado se registra en el rubro del cartón corrugado, donde el consumo aparente se duplicó como reflejo de la situación económica y el crecimiento industrial que incentivan a la producción de este tipo de papel para satisfacer la demanda originada fundamentalmente en el sector comercial.

En lo que hace al rubro de los papeles y cartones de uso doméstico mantuvieron el crecimiento registrado a lo largo de los últimos cinco años superando el millón de toneladas en 1996, lo que representa 10,2% más respecto al año 1995.

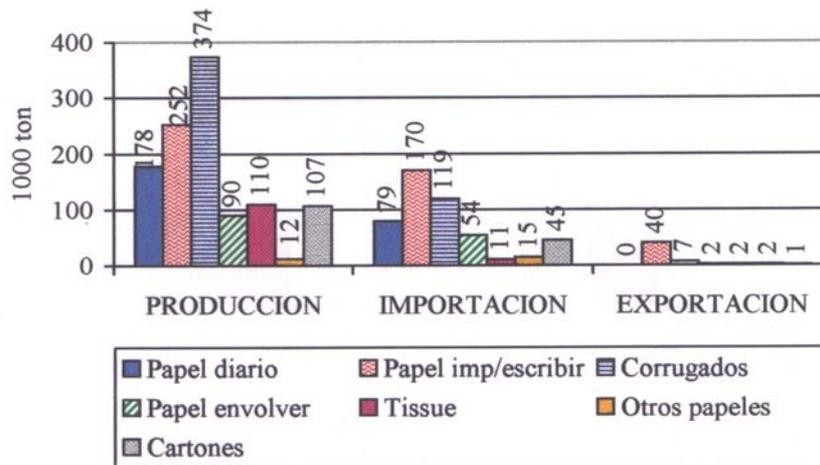
El total de las importaciones de todos los papeles aumentaron un 5% en 1996 respecto al año 1995, sin embargo se ha detectado una caída del 38% para papel periódico y un aumento del 43% en cartones corrugados.

Por otra parte, las exportaciones de papeles y cartones han caído en un 38% para el año 1996 respecto al año anterior.

En la figura 2.2 se presenta la producción, importación y exportación de papeles y cartones para la Argentina para el año 1996, mientras que la figura 2.3 permite comparar para el mismo año los mismos items para los diferentes productos relacionados a la industria papelera.

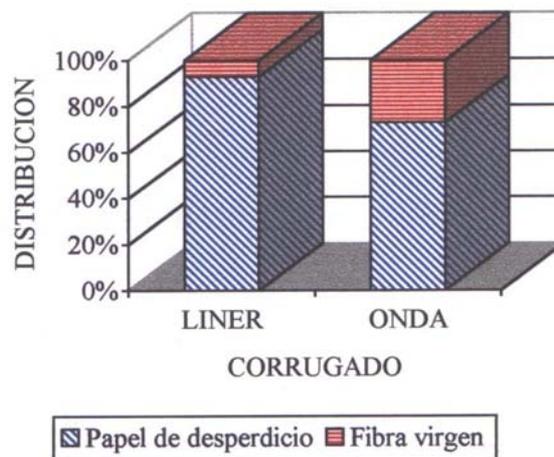


**Figura 2.2. Producción, importación y exportación de papeles y cartones para el año 1996 (1.000 ton).**



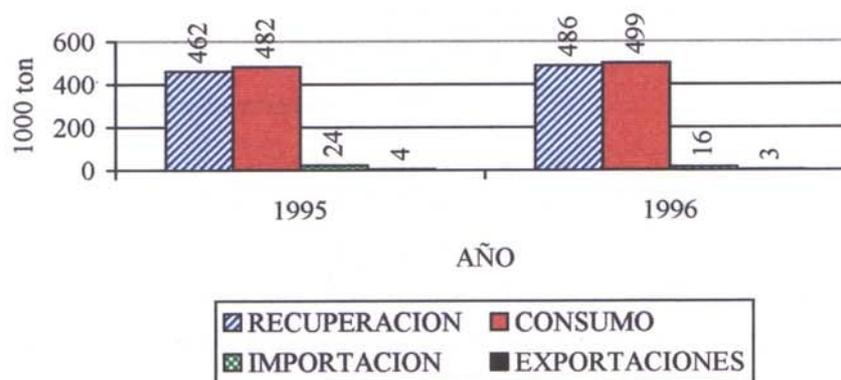
**Figura 2.3. Distribución de la producción, importación y exportación de papeles y cartones por tipos para el año 1996 (1.000 ton).**

Resulta interesante analizar el sector de los componentes de los cartones corrugados, donde la producción de los mismos a partir de papeles de desperdicio es altamente significativa, tal como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4. Contribución del papel de desperdicio en la fabricación de corrugados en la Argentina para el año 1996.**

La situación del papel de desperdicio en la Argentina para el año 1996 respecto al año 1995 registra un incremento en la recuperación y consumo y una caída en las importaciones y exportaciones tal como se presenta en la figura 2.5.



**Figura 2.5. El papel de desperdicio en la Argentina.**

El análisis respectivo de cada uno de los aspectos que han sido presentados anteriormente permiten interpretar la importancia que tiene en el contexto global lo concerniente al papel de desperdicio, resaltando la relevancia de la producción de corrugados fundamentalmente a partir del mismo. Esto a su vez también permite advertir el crecimiento del sector, por lo que es un tema que seguramente demandará en un futuro cercano la confluencia de tecnología y recursos calificados para afrontar la demanda.

## 2.2 EL RECICLADO DEL PAPEL.

### 2.2.1 Introducción.

El reciclado del papel no puede considerarse como una idea innovadora con la que se pretenden resolver casi mágicamente problemas que surgen en la actualidad. Por el contrario, ha sido una práctica habitual en las grandes industrias papeleras que desde siempre han estado reciclando sus propios recortes; sin embargo, la sentida necesidad de protección del medio ambiente y conservación de los recursos naturales torna al tema en una creciente y actual exigencia (2), convirtiéndose en algunos casos en casi una moda en la que tanto políticos como

medioambientalistas se refieren al tema como expertos y a su vez le dedican buena parte de su tiempo en debates en los cuales exponen sus propios puntos de vista (28).

Existe información en la que se consigna que ya en el año 1366 el gobierno de Venecia había autorizado a una empresa de Treviso a utilizar en forma exclusiva todo el papel recolectado en la región (29).

Sin embargo, a comienzos y mitad del siglo XVIII cuando el papel se elaboraba a partir de fibras textiles (trapos) es donde el reciclado ocupa un rol muy importante, principalmente por cuestiones económicas directamente relacionadas a los costos elevados de la materia prima virgen provenientes del lino y otras fibras agrícolas que precedieron a la aparición del algodón, considerada esta última como una fibra más económica (28).

A fines del siglo XVIII la impresión originó una demanda tal de papeles que los elaborados a partir de los trapos ya no eran suficientes. Esta situación ha facilitado desarrollos de tecnologías que terminan en la sustitución de las fibras textiles por fibras madereras dando origen a los papeles modernos. Mientras que la producción de estos últimos crecía, el precio de los mismos fue bajando hasta niveles que permitieron su uso masivo en productos descartables como periódicos, envoltorios, embalajes y un sinnúmero de otros usos; dando a lugar a un nuevo producto: *“el papel de desperdicio”*. Los primeros papeles de fibras madereras no eran preferidos para su reciclado, razón por la cual frecuentemente se quemaban (28). Sin embargo actualmente la incineración y el reciclado es un tema que se encuentra en una etapa de permanente debate bajo el concepto de máxima protección del medio ambiente (30). Por lo que existen instalaciones que contemplan el tratamiento de papeles para la recuperación de fibras, y la incineración de los residuos del proceso de elaboración para la generación de energía (31).

El reciclado normalmente está regido por la economía de recolección y procesamiento además de las presiones ejercidas por las necesidades de la comunidad (28). La palabra reciclado es simple para los medioambientalistas, pero estos deben darse cuenta que la misma no es sinónimo de recolección, y a su vez deben comprender que sí esta vinculado a la capacidad de reutilización, que depende

de la variedad de productos reciclados disponibles en el mercado, los cuales están supeditados directamente a tres factores: económicos, tecnológicos y nuevas actitudes psicológicas (32).

Durante la Segunda Guerra Mundial se alcanzaron niveles de reciclado importantes en Estados Unidos y Canadá y significativos en Europa y Japón inmediatamente después del cese del conflicto. Puede decirse que Europa ha mantenido a partir de entonces una fuerte recolección de papel de desperdicio. Por el contrario, en Estados Unidos y Canadá, por un lado la población dispersa y por otro el bajo costo de las fibras vírgenes, no han contribuido favorablemente a que el reciclado evolucione en forma importante sin sufrir altibajos (28). Como dato ilustrativo de la situación se sabe que en los Estados Unidos el nivel de reciclado decreció de un 35% durante la Segunda Guerra a un 18,7% para el año 1969 (33).

Sin embargo, los datos estadísticos en el ámbito mundial indican que para el año 1990 el 33,3% de las materias primas utilizadas para fabricar pulpas y papeles correspondió a fibras recicladas con un total de 84 millones de toneladas, la proyección permite estimar que para el año 2000 se supere el 40% (34).

Cabe destacar que la cantidad fibras secundarias utilizadas depende en gran medida de su proporción en la mezcla con fibras vírgenes.

En los Estados Unidos los recursos forestales de la región del norte suministran el 80% de las fibras, el 18% proviene de papeles recuperados y un 2% restante corresponde a otras fibras. Sin embargo, en el año 1950 se utilizaba en las mezclas un 65% de fibras vírgenes que se incrementó a un nivel del orden del 80% para los años 70 (35).

Mucho ha sido dicho sobre las posibilidades de revertir la tendencia de aumento de la proporción de fibras vírgenes, con lo cual se incrementaría el uso de fibras recicladas. La cuestión termina siendo en realidad cuán rápida y hasta que punto (35).

Los principales determinantes para dar una respuesta a la pregunta anterior incluyen: tecnología disponible para la utilización de fibras recicladas frente pulpas vírgenes; economías relativas del uso de fibras recicladas respecto a fibras vírgenes; obtención de un mercado aceptable de productos hechos con materiales reciclados; presiones causadas por los aspectos relacionados al medio ambiente; y la disponibilidad y costo de los suministros forestales. El último de los aspectos nombrado es relevante, el suministro de madera depende del incremento de la demanda de tierras para forestación y cantidad de arboles y como los mismos son manejados y utilizados (35).

La composición de material reciclable contenido en los residuos domiciliarios de diferentes ciudades del mundo es notablemente disímil, tal como se presenta en la tabla 2.2 (3).

**Tabla 2.2 Material Reciclable contenido en los Residuos de diferentes ciudades del mundo.**

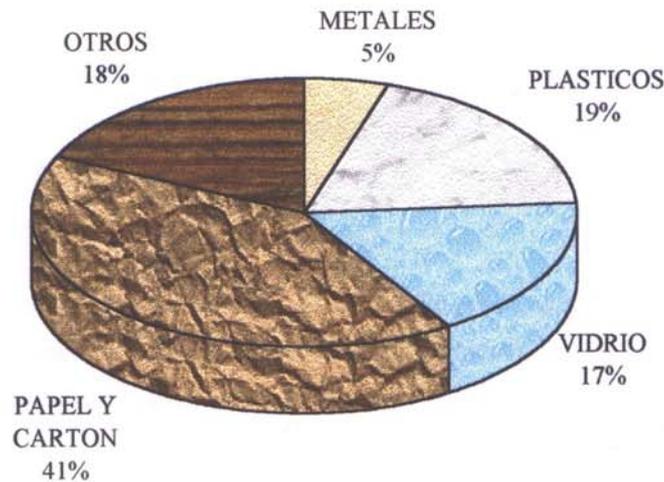
	<i>Mat. Org</i>	<i>Papel/Cartón</i>	<i>Plásticos</i>	<i>Metales</i>	<i>Vidrio</i>
Bs. Aires	55%	18%	10%	3%	7%
San Pablo	35%	17%	7,5%	3,3%	1,5%
New York	26%	35%	10%	13%	9%
Londres	38%	31%	7%	8%	8%
Calcuta	78%	3%	6%	1%	5%

Fuente: INSTITUTO PETROQUIMICO ARGENTINO/Lic. C.E. Solari

Para la ciudad de Buenos Aires se puede solamente reciclar aproximadamente un 40% del total de la basura, el resto es materia orgánica y otros. Sobre esta base se presenta en la figura 2.6 las proporciones de los distintos componentes en la basura reciclable, dentro del ítem otros se pueden considerar contenidos madera, escombros, materiales de origen textil, etc. (36). Puede observarse la importancia que tiene en dicha distribución los papeles y cartones.

Sin lugar a dudas uno de los problemas relacionados al reciclado de papeles está en la recolección de los mismos. Aunque muchos proveedores han mejorado los

métodos de clasificación, recolección y en definitiva las calidades obtenidas, queda todavía mucho que hacer al respecto (37).



**Figura 2.6. Participación de los distintos componentes en la basura reciclable.**

Los precios para los papeles recuperados se encuentran generalmente influenciados por una combinación de factores incluyendo los desequilibrios entre la oferta y la demanda, exportaciones, cuestiones climáticas, y sustitución de fibras. Eventualmente el precio de los papeles recuperados refleja el costo de recolección y procesamiento, como así también los aspectos económicos relacionados a la oferta y la demanda (38).

La calidad de los papeles de desperdicio está determinada por dos criterios: la calidad de la fibra y el grado de contaminación. La calidad de la fibra dependerá del tipo de papel en la basura: fibras de proceso kraft, sulfito, a la piedra, etc. El grado de contaminación esta relacionado a los materiales que deben ser eliminados para lograr los objetivos del reciclado (6).

Por lo tanto, se puede predecir que los papeles de desperdicio se encuentran en su máximo valor cuando se logra una buena separación domiciliaria. Una vez que se comienzan a mezclar con otros tipos de residuos no deseados su valor cae, esto se debe a que a posteriori se tenga que invertir en una costosa separación manual para que la materia prima vuelva a ser apta. Por otra parte, hay que destacar que en los

últimos años una gran cantidad de materiales extraños como ser resinas, tintas, arcilla, ceras o pegamentos entre otros se han agregado a los papeles y cartones que han complicado y a su vez obligado a invertir significativamente para modificar la tecnología destinada a su eliminación en las fábricas (39).

Por otra parte, debe considerarse que las empresas del sector que normalmente se denomina transformadores (imprentas, fábricas de envases, etc.), constituyen una fuente importante de papeles de desperdicio de buen grado de tipificación y limpieza.

Las concentraciones urbanas producen residuos cuya cantidad se altera con el ritmo de los vaivenes de la actividad económica. Cuanto mayor es la capacidad de consumo mayor es el volumen de residuos producidos. Esta situación fue comprobada en una investigación realizada por técnicos del CEAMSE para el Área Metropolitana de Buenos Aires. Las conclusiones del estudio para el período 1981-1983 indican que la recepción de residuos en el CEAMSE fue inversamente proporcional a la inflación; y que los distritos con mayor capacidad de consumo producen más residuos que las zonas marginales (40).

Por los aspectos que se han mencionado, es de esperar que en consecuencia también se presenten diferencias en las proporciones de papeles y cartones en la basura de distintas ciudades, y a su vez dentro de las mismas en los distintos niveles socioeconómicos. Un trabajo realizado durante el año 1971 en la Ciudad de Madison, Wisconsin (Estados Unidos), indica que los papeles de desperdicio producidos por persona rondan en 240 gr por día, y que los mismos están distribuidos en un 47% de papeles de diarios, 13% de revistas, 12% de papeles resistentes y un 28% de mezclas de otros papeles (39).

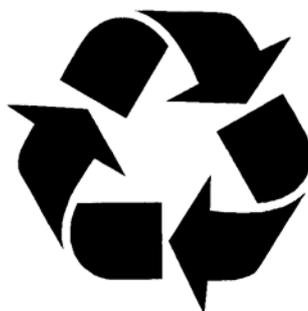
Un estudio similar al citado anteriormente se ejecutó a mediados de la década del 90 en la Ciudad de Posadas, Misiones (Argentina), en el mismo la recolección se realizó según el nivel socioeconómico de las viviendas: Tipo I (alto), Tipo II (medio), Tipo III (bajo) y un Tipo IV que incluyó oficinas públicas y negocios. Los papeles se separaron en: diarios, revistas, blancos, cartones y mezcla. Los resultados indican que el mayor porcentaje de papel que se elimina en forma domiciliaria

pertenece a papel periódico con un 41%, y en menor medida cartones con un aporte del 27%. Estos resultados curiosamente son similares a los que arrojó el trabajo realizado en Madison. Además, el estudio ha establecido que el porcentaje de participación fue aproximadamente de un 60%, con lo cual las progresiones determinan que sería factible una planta de reciclado para la ciudad de Posadas con una capacidad de procesar 5 toneladas/día de papeles mezclados. Por otra parte, la composición de la mezcla proveniente de cada uno de los Tipos socioeconómicos, en función de los porcentajes de cada una de las calidades de papel sería: 66% de cartones, 18% de papel periódico, 7% de revistas, 7% de blancos y un 2% de varios. Resulta interesante comparar la participación de este estudio de un 60% frente al 36% registrado en los Estados Unidos, esto estaría indicando una mayor conciencia ecológica que se ha profundizado en los últimos años en la población mundial (41).

La cantidad de papeles y cartones que se puedan recolectar condicionan el tamaño de la planta de reciclado, para que las mismas operen eficientemente se estima que deben tener un tamaño entre 50 y 100 ton/día de capacidad (42,43). En consecuencia, poblaciones muy pequeñas hacen que no se disponga del mínimo de materia prima, como así también los costos de transporte para el acopio de la misma desde poblaciones muy dispersas hacen que los proyectos sean económicamente no viables.

### **2.2.2 Concepto de reciclado.**

En los últimos años en el mercado ha aparecido un sinnúmero de productos reciclados y reciclables, los mismos se pueden identificar mediante el símbolo que se presenta en la figura 2.7.



**Figura 2.7. Símbolo de reciclado y reciclable.**

Es sabido que el sistema productivo adoptado por el capitalismo usa los recursos naturales finitos de la tierra, extrayéndolos y utilizándolos como tales o en la generación de nuevos productos para su consumo. El resultado termina casi siempre en la dilapidación y modificación del ecosistema con profundas agresiones sobre el medio ambiente, con las consecuencias que ello acarrea. La presión popular ha impulsado la búsqueda de la solución a la ecuación en la que intervienen los recursos naturales finitos y los sistemas productivos agotadores de dichos recursos. La respuesta gira en torno a lo que se conoce como las tres erres (RRR): reducir, reutilizar y reciclar. En la figura 2.8 se pretende mostrar como interviene el reciclado en el esquema de las tres erres (44).

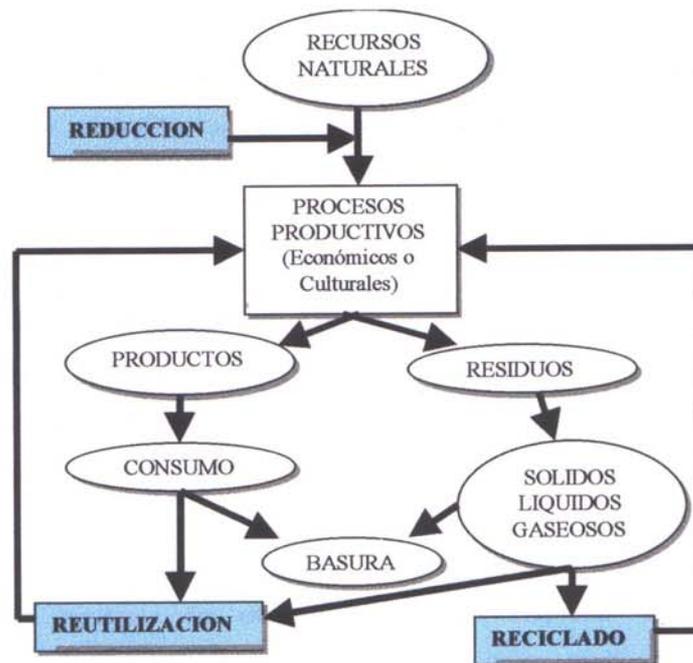


Figura 2.8. Esquema de las tres erres (RRR).

El significado de cada una de las tres erres es el que se presenta a continuación (3):

- Reducción: contempla todas las acciones tendientes a disminuir la generación de residuos en origen, por racionalización en el uso de packaging o pautas de consumo.
- Reutilización: tiene que ver con volver a utilizar o dar un uso diferente para el que fue concebido el elemento descartado.

- **Reciclado:** se refiere al uso de materiales usados para ser transformados en materia prima nuevamente.

Como el desafío ambiental es a largo plazo, los negocios mundiales irán alejándose cada vez más de las industrias que contaminan y consumen los recursos finitos. En tal sentido, se afianzarán aquellas industrias que se basen en lo que se da a llamar las “4 R” de la sabiduría ecológica: reparación, reacondicionamiento, reutilización y reciclaje. Es de esperar entonces que en el Siglo XXI las empresas trabajarán en el control de la contaminación, el reciclaje y la sustitución de recursos, la eficiencia de la energía y su suministro adaptado desde el punto de vista ecológico, la tecnología de la información y la biotecnología (45).

Los conceptos anteriormente vertidos se inscriben dentro de lo que se ha dado por llamar La Cuarta Ola, que en lo que hace al medio ambiente adopta como consigna la Preservación, en La Tercera Ola fue la Sustentación y en La Segunda Ola el Consumo (45).

### **2.2.3 Diseño para el medio ambiente.**

Dentro del concepto de que “En la naturaleza nunca hay premios o castigo, hay consecuencias”(46), las empresas tienen la opción de rediseñar sus sistemas de producción para alcanzar tanto la calidad ambiental como la eficiencia económica (1)

Así en el año 1992 se originó el concepto de diseño para el medio ambiente (DFE), como resultado del esfuerzo de algunas empresas especializadas en electrónica que intentaban incorporar una componente medioambiental en sus productos (1).

Diseño para el medio ambiente puede ser definido como una consideración sistemática de la función del diseño con respecto a claros objetivos medioambientales, de salud y seguridad a lo largo del ciclo de vida completo del producto y del proceso (1).

En este esquema DFE representa una encrucijada conceptual en la que convergen dos fuerzas de empuje que son la integración empresarial y el desarrollo sostenible.

La integración empresarial representa la reingeniería de los procesos y sistemas de información empresarial para mejorar el trabajo en equipo y la eficiencia en todos los aspectos. La gestión de calidad total ha contribuido a fortalecer los cimientos de la integración empresarial, fortaleciéndose más recientemente con el proceso de “desarrollo integral de productos” (DIP) (1).

El desarrollo sostenible representa el progreso industrial mediante el cual “se satisfacen las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”. La base de esta fuerza de empuje lo constituyen el liderazgo medioambiental y la prevención de la contaminación (1).

El término “desarrollo integral de productos” describe un proceso que ya ha sido adoptado por un gran número de empresas, es un proceso en el cual todos los grupos involucrados en el ciclo de vida de un producto participan como equipo en la temprana comprensión y resolución de cuestiones relacionadas al mismo como calidad, capacidad de producción, fiabilidad, mantenimiento, medio ambiente y seguridad (47).

El ciclo de vida del producto y del proceso se puede a su vez analizar como un ciclo de vida económico y físico (47):

- Ciclo de vida económico:
  - a) Del producto: incluye actividades como la concepción del mismo, desarrollo, lanzamiento mantenimiento, madurez, reevaluación y renovación bajo la forma de un nuevo producto de última generación.
  - b) Del proceso: incluye el desarrollo del diseño de las instalaciones y procesos, arquitectura y construcción, mantenimiento y operación y sus mejoras.

- Ciclo de vida físico:
  - a) Del producto: incluye una secuencia de transformaciones de materiales y energía desde la extracción y procesamiento de los mismos, fabricación y ensamble de los productos, distribución, utilización y la recuperación y reciclaje de los materiales incorporados en el producto.
  - b) Del proceso: considera también una secuencia de transformaciones de materiales y de energía utilizadas en el equipo y suministros del proceso, operación y control del mismo, limpieza y mantenimiento del equipo como así también la eliminación o recuperación de residuos.

Un factor que terminó fortaleciendo el DFE ha sido la proliferación del eco-etiquetado que se ha dado fundamentalmente en los países desarrollados. Si bien es cierto que no se tiene claro cuál es la respuesta de los consumidores a las eco-etiquetas, sí se sabe que muchos fabricantes están preocupados por las potenciales ventajas o desventajas de las mismas. En la figura 2.9 se presentan algunas de las eco-etiquetas más difundidas (48).



Selección medioambiental – Canadá



Eco-marca - Japón



Cisne blanco – Escandinavia



Estados Unidos

**Figura 2.9. Eco-etiquetas.**

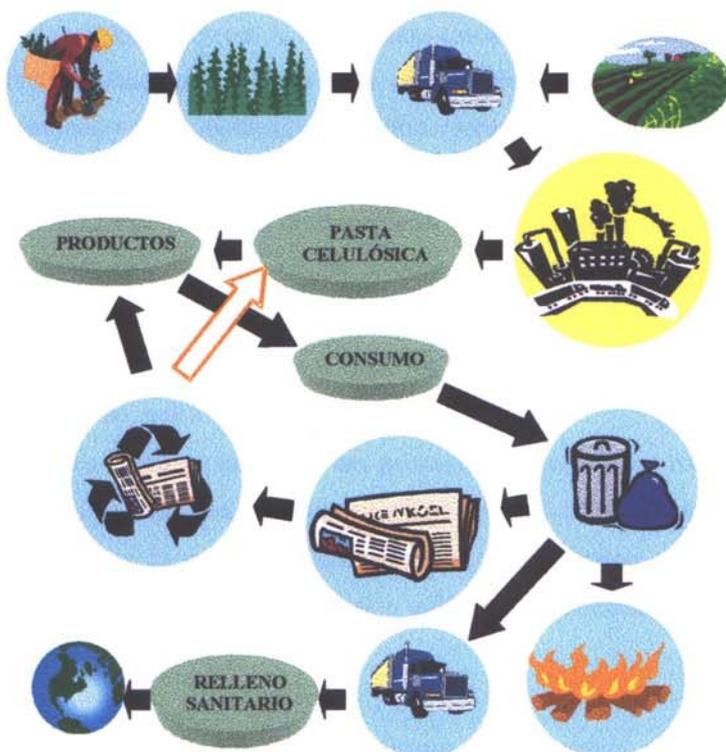
Además del tradicional logotipo de reciclado, se tienen por ejemplo el adoptado en Australia para cajas de cartón (49) y otros, estos se presentan en la figura 2.9.



**Figura 2.10. Logotipos usados en cartones corrugados.**

#### 2.2.4 El reciclado en el ciclo productivo del papel.

En la figura 2.11 se presenta a grandes rasgos el proceso productivo del papel, en el mismo se puede observar la inserción del reciclado.



**Figura 2.11. El reciclado en el ciclo de producción del papel.**

De la figura 2.11 se desprende que la producción de papel o pulpas tienen su inicio con la reforestación, a la que se sigue un período de formación de los bosques para su posterior tala y transporte a las plantas industriales, cabe aclarar que en otras regiones del planeta se aprovechan para dichos fines madera proveniente de bosques naturales. En el esquema también se resalta una posibilidad bastante promocionada de obtención de fibras de origen diferente a las extraídas a partir de los árboles, como por ejemplo las provenientes de plantaciones de cáñamo (50), o bien de residuos agrícolas originados por los cereales o desechos de la industrialización de la caña de azúcar.

El pulpado es el proceso mediante el cual a la materia prima se la transforma en una masa fibrosa por ruptura de las uniones de su estructura. La tarea puede llevarse a cabo mediante un tratamiento mecánico, térmico, químico o una combinación de los mismos. En general los procesos más difundidos son los mecánicos, químicos y semiquímicos (51).

Con las pulpas vírgenes y en algunos casos con las fibras secundarias se efectúan las mezclas para distintos usos en una gran variedad de productos de papeles y cartones y pulpa moldeada que se incorporan al mercado consumidor.

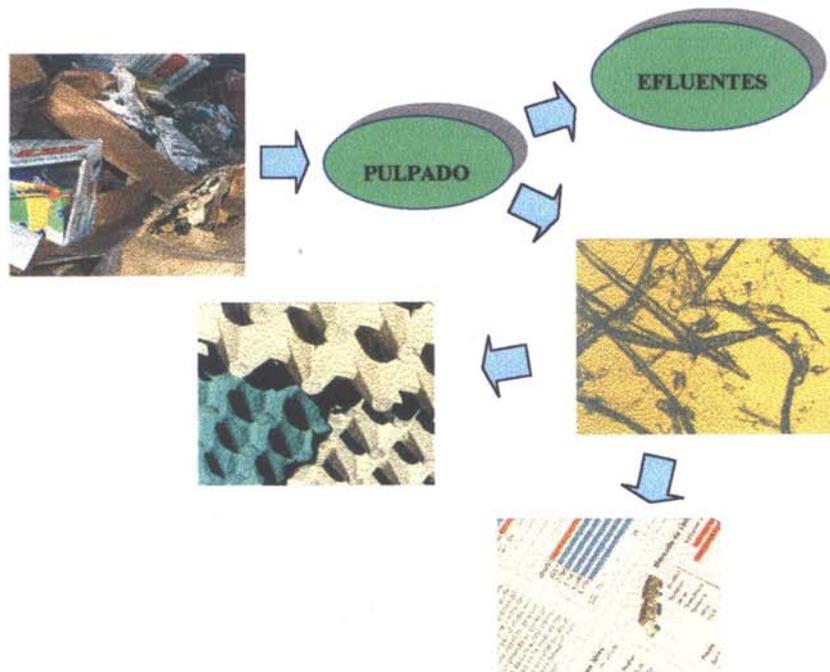
Estos, posterior a su uso, se incorporan al circuito de la basura. Durante el proceso de recolección se lleva a cabo la mayor parte de la clasificación para su aprovechamiento, en alguna de las siguientes categorías (52):

- Fibras oscuras y fuertes de pulpas kraft: en esta categoría se incluyen cajas de cartón corrugado, bolsas, papeles de envoltura, etc.
- Fibras débiles de blancura media: las principales fuentes son productos de una mezcla de pulpa mecánica con química, como ser periódicos, revistas, etc.
- Fibras blancas y fuertes de pulpas químicas: corresponden a este grupo los papeles blancos de escritura e impresión utilizados en oficinas e impresiones de alta calidad.

Los papeles y cartones muy contaminados y rechazados en el proceso de clasificación pueden ser incinerados o destinados para rellenos sanitarios incorporándolos a la tierra.

En cambio, los aceptados durante la clasificación se conducen a las plantas de reciclado donde se someten a un proceso que recupera las fibras y las incorpora nuevamente al mercado consumidor bajo la forma de distintos productos, también estas fibras pueden ser usadas para obtener mezclas con fibras vírgenes.

El proceso de reciclado del papel puede considerarse a grandes rasgos como el tratamiento que se le da a papeles y cartones con la finalidad de recuperar las fibras poniéndolas en suspensión, dependiendo el uso que se le dará a las mismas se eliminan efluentes que contienen tintas y cargas que pueden ser recuperables. Las fibras se emplean para distintos fines como fabricación de papeles y cartones y pulpa moldeada. En la figura 2.12 se presenta un esquema al respecto.



**Figura 2.12. Reciclado del papel.**

### **2.2.5 Beneficios de reciclar papeles y cartones.**

En realidad; la respuesta a la pregunta ¿por qué reciclar?, se fundamenta en dos aspectos que tienen la mayor gravitación: la conservación de los recursos

---

naturales y solución de problemas ambientales mediante la reducción de los residuos sólidos en la basura (2, 53, 54).

El papel de desperdicio se constituye en un recurso que es socialmente relevante, por sus aspectos ecológicos como así también por los económicos (55).

Para que el reciclado sea efectivo deben entonces considerarse también los beneficios económicos, que en última instancia resultarán del balance de los costos de (56):

- Recolección y transporte de los papeles de desperdicio hasta las fábricas.
- Costo de separación de los contaminantes del papel de desperdicio.
- El costo del papel de desperdicio.
- El costo propio del proceso de reciclado.

El costo de la fibra secundaria es quizá uno de los aspectos más atractivos (29, 34, 55). Por otra parte, las plantas de producción de pulpas a partir de fibras secundarias tienen una menor inversión de capital respecto a las que producen fibras vírgenes (34, 55).

Además, la producción de papeles reciclados se realiza con importantes ahorros de energía y agua comparativamente frente a la producción de los mismos a partir de pulpas químicas, al respecto existen datos que difieren entre sí, pero estarían en un 35% menos de consumo de agua y un 64% menos de consumo de energía (34, 54, 57).

Desde el punto de vista de la conservación de los recursos forestales reciclar es importante, a pesar que tan solo el 1% de todo el consumo de papel se basa en materia prima procedente de bosques tropicales, siendo la agricultura la mayor causa de deforestación (58). Se estima que por cada tonelada de papel reciclado se sustituyen entre 2 y 3 m<sup>3</sup> de madera, que equivalen a unos 15 a 20 árboles no muy grandes (54).

Si se toma en cuenta que la cantidad de papeles y cartones contenidos en la basura está entre un 20-40% (3), esto representa bastante volumen cuando los mismos son destinados para rellenos sanitarios, por lo tanto su aprovechamiento termina resolviendo favorablemente problemas de disposición de los residuos. Una tonelada de papeles y cartones ocupa unos 3 m<sup>3</sup> y su disposición tiene un costo del orden de los U\$S 4 (34).

Una solución para ciudades con poco espacio destinado para rellenos sanitarios es la incineración (55). Sin embargo, se tiene bien en claro que reciclar es mejor que tirar los papeles al vertedero, debido a que estos cuando se descomponen liberan gas metano que se incorpora al efecto invernadero. No obstante, no está suficientemente clara la ventaja del reciclado frente a la incineración para la generación de energía. Los papeles son un buen combustible, por lo que reemplazan la necesidad de utilizar combustibles fósiles para quemar basuras en un incinerador, sin embargo la incineración no es de agrado público por el temor a las emisiones. A pesar de ello, no hay razón por la cual el reciclado y la incineración entren en conflicto, hay papeles que por su estado y propiedades pueden ser destinados a alguna de las dos alternativas (58).

Por último, el reciclar produce un 74% menos de contaminación del aire (54). Además, se estima que por cada 500 toneladas de papel recolectado para su reciclado se crea una fuente de trabajo. Al mismo tiempo, la actividad permite incorporar ingresos a los hogares de grupos integrantes de una comunidad (59).

### **2.2.6 Desarrollo y sustentabilidad.**

En el año 1983 se crea la “Comisión Mundial” bajo la presidencia de la Sra. Brundtland, la que ante la 42<sup>o</sup> Asamblea General de las Naciones Unidas en el año 1987 presentó el informe “**Nuestro Futuro Común**”, interpretando que los objetivos de conservación de los recursos naturales y calidad ambiental no se enfrentan a los objetivos del desarrollo socioeconómico y el progreso material; sino que por el contrario, van juntos y están íntimamente relacionados entre sí (60).

Resulta particularmente interesante analizar algunos de los párrafos del informe, en el que se establecen conceptos como los que se resumen en los párrafos a continuación (60):

- Tanto la Economía como la Ecología son necesarias para mejorar la suerte de la humanidad, no están solamente para producir riquezas y proteger la naturaleza.
- Medio ambiente y desarrollo no son contradictorios. El desarrollo no existe en un medio ambiente deteriorado, y este último no puede defenderse si el desarrollo no tiene en cuenta los costos de la destrucción ambiental.
- Cuando se dicten leyes o se adopten decisiones, hay que integrar la economía y la ecología, no tan solo para proteger el medio ambiente y el desarrollo sino también promover a este último.
- Sin querer detener el desarrollo reconoce que para resolver los problemas de la pobreza y del desarrollo debe instaurarse una etapa de crecimiento en la que los países desarrollados jueguen un rol importante.

Sobre la base de los conceptos anteriores se da a lugar a un nuevo modelo de desarrollo: **El Desarrollo Sustentable**, también mencionado en diversas publicaciones como **Desarrollo Sostenible**, cuya definición es en síntesis la siguiente: “satisfacer las necesidades de esta generación sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para cubrir sus propias necesidades” (1, 60, 61, 62, 63).

Este nuevo modelo ha permitido ver y comprender que los modelos vigentes conspiraban contra los principios que lo sustentaban, y en consecuencia se recorría un camino que conducía a una verdadera emergencia ecológica, que comprometían la continuidad de la vida sobre el planeta (60).

En definitiva, el término desarrollo sustentable agrupa dos líneas de pensamiento con relación a la gestión de las actividades de los seres humanos: por un lado aglutina las metas del desarrollo y por el otro el control de los impactos

negativos que se producen sobre el medio ambiente como consecuencia de las actividades (62).

El término desarrollo en este contexto puede estar contenido en la Declaración de los Derechos Humanos de Naciones Unidas de 1948, o en la Declaración Sobre el Derecho al Desarrollo de 1986; que interpreta que todos tienen derecho a disfrutar un nivel de vida acorde a los términos de salud y bienestar, con todo lo que ello implica. Documentos posteriores y Nuestro Futuro Común remarcan que el desarrollo también incluye el derecho de voto en un marco de gobierno representativo (62).

El componente sustentable, en la definición de desarrollo sustentable enfatiza la necesidad de no comprometer las necesidades de las generaciones futuras, esto requiere que se desarrollen actividades que no agoten lo que se considera el “capital ambiental”, conformado por (62):

- Capacidad de los sistemas naturales de absorber la contaminación sin efectos secundarios que implican altos costos y se trasladan a generaciones futuras.
- La existencia finita de recursos no renovables.
- Recursos naturales renovables, estos deben ser explotados con mucho criterio para que se puedan renovar, el secreto quizá radica en no sobreexplotarlos.

Se han establecido criterios operativos para el desarrollo sostenible, estos pueden ser resumidos en (61):

1. Principio de la irreversibilidad cero: lleva implícita la necesidad de reducir a cero las emisiones de tóxicos que se acumulan y producen en los seres vivos daños irreversibles.
2. Principio de la recolección sostenible: establece que las tasas de regeneración de los recursos naturales renovables deben ser iguales a las de recolección o utilización.
3. Principio del vaciado sostenible: es cuasi-sostenible la explotación de recursos naturales no renovables cuando su tasa de vaciado o uso sea igual a la tasa de creación de sustitutos de características renovables.

4. Principio de emisión sostenible: la cantidad de residuos eliminados no debe superar a la capacidad de los ecosistemas de asimilarlos naturalmente. Esto implica que la emisión de no biodegradables tenga que ser cero.
5. Principio de selección sostenible de tecnologías: se deben alentar las tecnologías que tienden a aumentar la productividad de los recursos frente a las que aumentan la cantidad que se extrae de los mismos.
6. Principio de precaución: exige una actitud que permita identificar y descartar anticipadamente situaciones que pudieran conducir a desenlaces catastróficos.

Sobre los elementos que se han mencionado, es que la comunidad empresarial ha establecido algunos elementos que son comunes para llevar a cabo el desarrollo sustentable (63):

1. Igualdad: establece que todos los pueblos de la Tierra tengan igualdad de acceso y oportunidad de mejorar su bienestar económico.
2. Administración responsable: todas las construcciones, procesos y productos deben ser proyectados para minimizar su impacto sobre el medio ambiente y los ecosistemas.
3. Límites: establece un uso racional de los recursos no renovables.
4. Comunidad global: establece que los perjuicios sobre el medio ambiente y los ecosistemas no tienen delimitaciones establecidas por fronteras geográficas o nacionales.
5. Naturaleza sistémica: el desarrollo se debe producir con plena conciencia de las inter relaciones entre la actividad del hombre y el ecosistema natural.

En resumida cuenta, los conceptos de desarrollo sustentable anteriormente mencionados son aplicables a sistemas productivos en los que el balance de materia se debe cumplir inexorablemente: nada se crea ni se destruye, todo se transforma. En la figura 2.13 se intenta dar un bosquejo que muestra la inter relación entre los distintos componentes que intervienen en el escenario productivo (60).

En la figura 2.13 se muestra como el proceso de producción utiliza el ecosistema como fuente de recursos, los que mediante el capital, el trabajo y energía





**Figura 2.14. Ciclo sostenible del papel**

Sobre la base de modelos económicos utilizando las proyecciones de la demanda, oferta y precio de la celulosa, se armó un modelo para responder a cuestionamientos sobre si a largo plazo se contará con suficiente madera para papel y otros productos; el estudio arrojó algunas conclusiones importantes (65):

- La demanda de celulosa se duplicará en los próximos 50 años.
- Existe suficiente fibra maderera para cubrir la demanda, pero es posible que su precio se incremente. Se asume que en las áreas tropicales y subtropicales se implementarán nuevas reforestaciones que dominarán cada vez más la oferta de madera por sus condiciones de cultivo.
- La escasez de fibras resultaría en caso que se amplíen las áreas de preservación y se imponga restricciones al desarrollo de plantaciones forestales.
- El incremento del precio de la pulpa de madera incentivará a la inversión en la regeneración de bosques y forestación.

En consecuencia, las fibras vírgenes deben provenir de bosques y plantaciones forestales que se conduzcan con prácticas de una gestión sostenible (58).

El manejo sostenible de los bosques tiene tres elementos esenciales (65)

- Los bienes y servicios deben ser sustentables. Incluyen los productos maderables, los no maderables (nueces, pescado, recreación, etc.), protección del agua y de la tierra, mantenimiento de los ecosistemas, salud y vitalidad forestal.
- La diversidad biológica debe conservarse. Incluye paisajes, ecosistemas, y genética.
- Los impactos económicos y sociales deben ser positivos

El desarrollo sostenible del bosque puede llevar un tiempo prudencial de adaptación gradual al cambio, se estima que la sustentabilidad se podría alcanzar en un período mínimo de dos rotaciones de tala, a este proceso se llama Mayordomía del Bosque (65).

Volviendo a la figura 2.14, otra alternativa de provisión de fibras vírgenes constituyen las que provienen de las especies no maderables. Estas presentan algunas ventajas y también desventajas(65):

- Pueden procesarse en fábricas más pequeñas, pero con costos más altos y mayor nivel de contaminación frente a las pulpas elaboradas con madera.
- El uso de estas fibras es importante en regiones donde la madera es escasa y se tiene un exceso de tierras para cultivo o desechos (paja).
- Para promover el uso de fibras no derivadas deben impulsarse políticas destinadas a favorecer la adquisición de productos hechos con estos materiales.

En resumidas cuentas, el ciclo sostenible del papel requiere que las fábricas operen con el máximo uso eficiente de la energía, y al mismo tiempo minimizar al máximo los niveles de contaminación mediante el tratamiento de los efluentes o cambiando los procesos de producción. En tal sentido, las plantas más nuevas tienen

la posibilidad de cerrar completamente sus procesos, con lo cual se logra minimizar el impacto ambiental, pero no eliminarlo totalmente. En los últimos años se ha logrado reducciones muy importantes en el consumo de agua como así también en la polución del agua y del aire por parte de las empresas productoras de pulpas (58).

En lo referente a los aspectos energéticos, podemos decir que la industria papelera tiene ciertas ventajas frente a otras, cubre una buena parte de sus necesidades energéticas quemando subproductos (corteza, licor, etc.), lo que se considera como una fuente renovable de energía. También se puede decir que no contribuye a la emisión neta de CO<sub>2</sub>, ya que se compensa con las reforestaciones (64). Por lo tanto, la contribución neta del dióxido de carbono al efecto invernadero sería despreciable, teniendo en cuenta que una hectárea de forestación sería capaz de eliminar entre 20 y 27,5 toneladas de dióxido de carbono (66).

El efecto invernadero es motivo de gran preocupación en los últimos años, se sospecha que la temperatura del planeta esta aumentando debido a gases como el dióxido de carbono y metano que se acumulan y retienen más calor dentro de la atmósfera, haciéndose notar que la contribución del metano a este efecto es 25 veces más poderoso que el CO<sub>2</sub>. El problema radica en que un pequeño cambio en la temperatura media de la tierra conduciría a cambios en el clima global, con las consecuencias que ello pudiera acarrear (65).

Investigaciones han llegado a la conclusión que el nivel de dióxido de carbono se ha incrementado en un 25% en los últimos 150 años, pero lo más grave es que se estima que en los próximos 50 años el mismo se duplicará (67).

Las pastas celulósicas en muchas oportunidades deben ser blanqueadas para mejorar su aspecto. El cloro gaseoso fue utilizado como el mejor agente blanqueador, hasta que su uso se asoció con la formación de productos químicos altamente tóxicos denominados dioxinas. Como resultados de tal situación, aparecen dos procesos alternativos de blanqueo: uno de ellos utiliza el dióxido de cloro, también denominado libre de cloro elemental (ECF – elemental chlorine free); y el otro conocido como totalmente libre de cloro (TCF – totally chlorine free), que como su

nombre lo dice emplea blanqueadores libres de cloro, como el hidrógeno, peróxido, oxígeno, ozono y enzimas (65).

Volviendo a la figura 2.14, es importante en el ciclo el impacto de la transformación del papel y del cartón en otros productos como revistas, empaques, etc. En esta etapa frecuentemente se utiliza químicos tóxicos que dan a lugar a emisiones y desechos, siendo los más importantes los componentes orgánicos volátiles (COV) y la goma. Entre los primeros se encuentran solventes en gomas y tintas para impresión. Los solventes se encuentran en el smog de las ciudades y las gomas de calcomanías y encuadernación terminan dificultando el proceso de reciclado de los papeles. Ultimamente se ha visto como mediante algunas tintas basadas en agua y/o aceites reducen la emisión de compuestos orgánicos volátiles, pero al mismo tiempo dificultan y hacen más costosos los procesos de su remoción durante el reciclado. Así también los nuevos pegamentos en base de agua resultan buenos para el medio ambiente pero al igual que todas las colas dificultan el repulpeo (65).

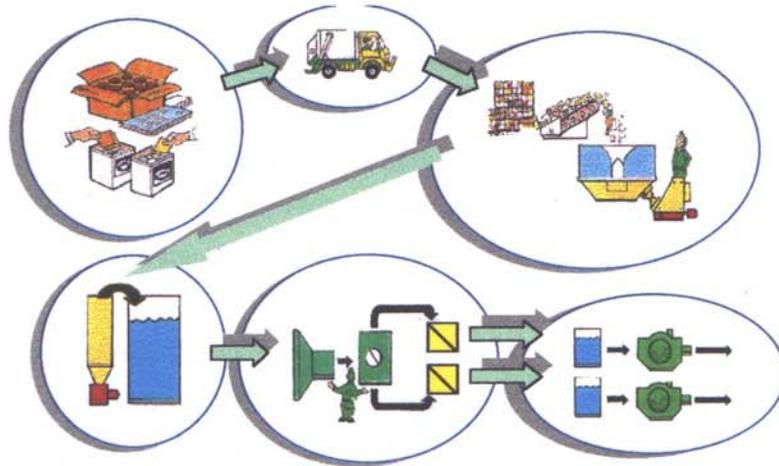
Si bien es cierto que se podría cubrir con facilidad la demanda de papel en los próximos años, hay discrepancias entre el sector empresarial y los grupos ambientalistas sobre el consumo del mismo. Los primeros se manifiestan en contra de establecer límites al consumo; mientras que los ambientalistas aceptan que la ecoeficiencia adoptada por los primeros resulta útil, pero no suficiente. Una encuesta del Reino Unido de 1994, indica que el empaquetado excesivo sería la principal fuente de desecho o uso innecesario de papel; le siguen en orden de importancia la propaganda enviada por correo, el fotocopiado en las oficinas y suplementos de periódicos. Por lo que es recomendable que se busque la forma de mejorar la eficiencia de utilización del papel, reduciendo el empaque sin afectar al consumidor, disminuyendo la propaganda enviada, fotocopiando las dos caras de la hoja, etc. (65).

De acuerdo a lo propuesto en la figura 2.14, el ciclo sostenible del papel se completa con recolección de los residuos y su clasificación, finalizando con las alternativas de usos de los mismos: reciclado para recuperación de fibras, relleno sanitario o incineración. En el apartado 2.2.5 del presente trabajo se mencionan las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas.

## 2.3 TECNOLOGIA DEL RECICLADO DEL PAPEL.

### 2.3.1 Introducción.

En la figura 2.15 se indica un esquema simplificado de una de las alternativas del tratamiento que reciben los papeles durante el reciclado de los mismos (68).



**Figura 2.15. Esquema simplificado del reciclado del papel**

De la figura 2.15 se desprende que el tratamiento de los papeles se da inicio con la clasificación y posterior transporte a los centros de reciclado. La etapa siguiente es la más importante, consiste en el pulpado cuyo objetivo es el de desintegrar en presencia de agua la materia prima, liberando las fibras. La suspensión de fibras e impurezas se bombea a un depurador dinámico de alta consistencia donde se eliminan los objetos extraños de mayor peso. El producto aceptado se almacena en tanques, desde donde se pasan a un despastillador o bien a un tamiz, las fibras resultantes aceptadas de cualquiera de las dos alternativas pueden posteriormente pasar a una etapa de fraccionamiento que da a lugar a fibras cortas y largas. Las fibras clasificadas se almacenan en tanques separados desde donde se conducen a espesadores, y desde estos a la maquina de papel.

El esquema de la figura 2.15 es ilustrativo y en consecuencia no es la única alternativa, existen otras que dependerán del tipo de producto final que se desea obtener, como así también de la calidad y tipo de materia prima que se va a procesar.

### 2.3.2 El proceso de pulpado.

Durante el proceso de pulpado, las variables temperatura y presión se establecen en función de experiencias previas, sin embargo, generalmente la presión es la atmosférica. La temperatura de pulpado depende del tipo de papeles recuperados, químicos, proceso de blanqueado y tipo de pulpa destinada a elaborar. Los productos químicos utilizados para destintado casi siempre se agregan durante el pulpado. Por ejemplo, cuando se tratan papeles con alto contenido de fibras de pulpa mecánica, las temperaturas bajas dan los mejores resultados, pero si se agregan químicos para destintado puede resultar necesario operar a niveles mayores, en estos casos se deben adoptar soluciones de compromiso. Se ha demostrado que los tiempos de desintegración para llegar al 100% de desfibrado se reducen notablemente con el aumento de la temperatura del proceso (69).

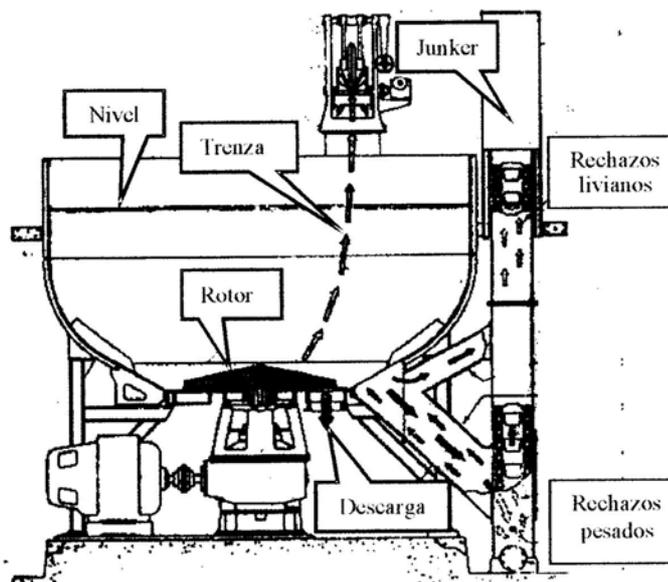
Entre los años 1500 y 1600 la desintegración de pulpas en forma discontinua se efectuaba en algunas pocas fábricas en Europa con el sistema Kollergang. El diseño original constaba de una piedra cilíndrica que se movía circularmente sobre la pulpa a una consistencia del 25% mediante el uso de caballos (70).

En el año 1920 aparece en el mercado un equipo (Breaker Beater) para operar en forma continua a consistencias del 4%, con capacidades de procesar entre 40 y 150 ton/día de papeles recuperados. En el año 1939, Black Clawson inventó el hidrapulper o pulper que resultó en uno de los avances más importantes para el procesamiento de papeles de desperdicio (70).

El pulper es un recipiente de metal u otros tipos de materiales, provisto de deflectores que interrumpen el flujo de la pulpa. En el fondo, y en el centro del tanque se encuentra un pesado rotor de acero provisto de espas. El rotor es impulsado por un potente motor, con su movimiento agita vigorosamente a los papeles y el agua logrando de esta manera la dispersión de las fibras.

El pulper tiene un extractor de trenza (Ragger), cuya finalidad es la de atrapar alambres, cintas, plásticos y otros materiales no pulpables que son eliminados hacia fuera cuando se gira la misma; muchas veces esta se ceba con alambres para

aumentar la efectividad. Además, algunos equipos tienen adosado un extractor o recogedor de desperdicios (Junker), este permite separar los rechazos pesados que van al fondo de los livianos que flotan. Rodeando el rotor hay una placa perforada con orificios apropiados para el tipo de desfibración deseada, el material desfibrado pasa a una cámara de extracción que se conecta mediante un tubo a la descarga. En la figura 2.16 se muestra un hidrapulper o pulper de baja consistencia (29,69,70, 71).



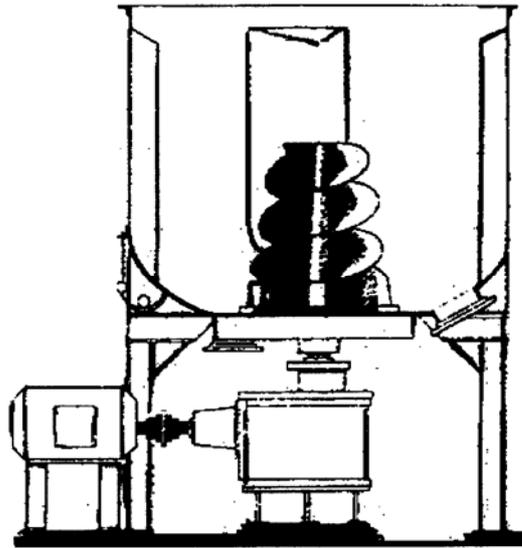
**Figura 2.16. Pulper o hidrapulper.**

El diseño del pulper cambia de acuerdo al modo de funcionamiento y las condiciones de proceso (29, 69):

- Método de pulpeo discontinuo.
- Método de pulpeo continuo.
- Funcionamiento a baja consistencia (3 a 6%).
- Funcionamiento a alta consistencia (8 a 18%).

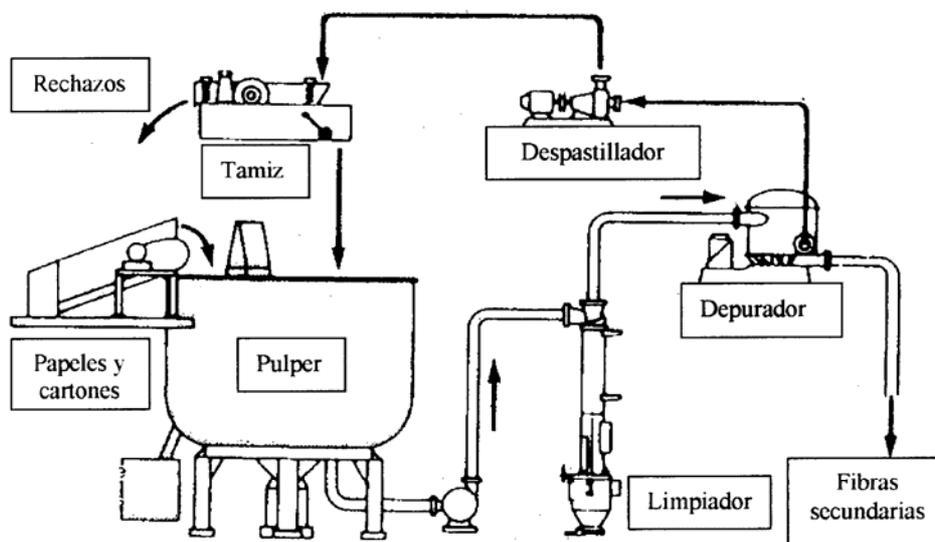
El pulper de alta consistencia se caracteriza por operar generalmente en forma discontinua, caso contrario debe adaptarse un sistema que permita diluir la pulpa para facilitar su transporte por medio de bombas. Estos además no tienen la trenza ni

tampoco adosado el separador de rechazos, y difieren también en el diseño del rotor. Los rotores para baja consistencia son mas planos mientras que para alta consistencia se usan rotores helicoidales. En la figura 2.17 se muestra un bosquejo de un equipo para alta consistencia discontinuo (69).



**Figura 2.17. Pulper para alta consistencia discontinuo.**

Un esquema simplificado de tratamiento de papeles de desperdicio que muestra una disposición convencional de los equipos se ejemplifica en la figura 2.18. en algunas plantas a la salida del pulper se coloca trampas magnéticas para retener impurezas metálicas; posteriormente se pasa por un depurador dinámico de alta consistencia (3-4%) tipo ciclónico, el que elimina por la acción de la fuerza centrífuga las partículas pequeñas de alta densidad. La corriente aceptada del ciclón centrífugo se pasa a un depurador presurizado y/o centrífugo y limpiadores de baja consistencia. La fracción aceptada pasa a la etapa siguiente, que puede ser el destintado si la idea es producir papeles blancos a partir de diarios y revistas. Por otro lado, la fracción rechazada tiene materiales firmemente adheridos a las fibras como recubrimientos plásticos, adhesivos, asfalto, resinas, ceras, etc., para liberarlas se pasa por un desfibrador o despastillador. La corriente emergente del despastillador se conduce a un tamiz en el que se separa los rechazos de la fracción aceptada, esta última se introduce nuevamente al pulper (29, 71).



**Figura 2.18. Distribución de equipos en un sistema de repulpeo.**

### 2.3.3 Usos de los papeles de desperdicios.

#### 2.3.3.1 Usos no papeleros.

Además del uso del papel de desperdicio con fines nuevamente papeleros, existe en el mercado una cantidad de otros tipos de productos que utilizan la misma materia prima, estos se clasifican en tres grupos (72):

- Fibras sueltas: pueden ser aislantes, lechos para animales, pulpa moldeada.
- Fibras unidas: pertenecen a este grupo materiales compuestos con otras fibras, ligantes y cargas que dan a lugar a distintos tipos de tableros.
- Derivados químicos tales como azúcares, cetona, alcoholes, ácidos, etc.

De toda esta familia, resultan particularmente importantes los aspectos relacionados a la elaboración y propiedades de los productos de pulpa moldeada, como así también sus usos (73, 74, 75).

### 2.3.3.2 Usos papeleros.

La aplicación más antigua de los papeles reciclados ha sido la fabricación de papeles rústicos como ser: estrazas, estracillas, y cartones grises. Con el correr del tiempo, se pudieron obtener pulpas mejores, con capacidad de competir con las pulpas vírgenes. Es así como aparecen papeles para uso personal y/o doméstico (libros, periódicos, postales, papeles de envolver, etc.), papeles de oficina, papeles para cajas de cartón corrugado, papeles de uso sanitario (pañuelos, papeles absorbentes, etc.) (76).

En la tabla 2.3 se presenta la relación que existe entre los productos de fibras secundarias y los papeles a partir de los cuales los mismos son obtenidos (77).

**Tabla 2.3 Relación entre productos de fibras secundarias y su fuente de papel original.**

<b>Fuente (Grupo funcional)</b>	<b>Stock de papel de desperdicio</b>	<b>Aplicación de reciclado mezclado</b>
1 Cartón para cajas	OCC, Mezclado	Grupos funcionales: 1, 4b, 6, 7, 8.
2 Papel de pulpa mecánica	Periódico, DI, (GW).	Grupos funcionales: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
3 Tissue y otro papel rizado a maquina	P/S, DI, (CP), Mezclado	Grupos funcionales: 2, 3, 5, 6, 7.
4 Cartón: a) duplex y triplex b) Combinación	P/S, DI, (CP), Mezclado	Grupos funcionales: a) 3, 5, 8 b) 1, 4, 6, 7
5 Impresión y escritura	P/S, DI, (CP), Mezclado de oficinas e imprentas	Grupos funcionales: 2, 3, 4, 5, 6, 7
6 Industriales: embalaje, conversión y misceláneos	Mezclado, P/S	Grupos funcionales: 1, 3 (Tissue kraft sin blanquear), 4, 6, 7
7 Papel y cartón para construcción	N.A. (reciclado interno)	Grupos funcionales: N.A. (reciclado interno)
8 Pulpa de mercado	N.A.	Grupos funcionales: 1, 2, 3, 5.

P/S: Sustitutos de la pulpa  
OCC: Cartones corrugados usados  
DI: Destintado

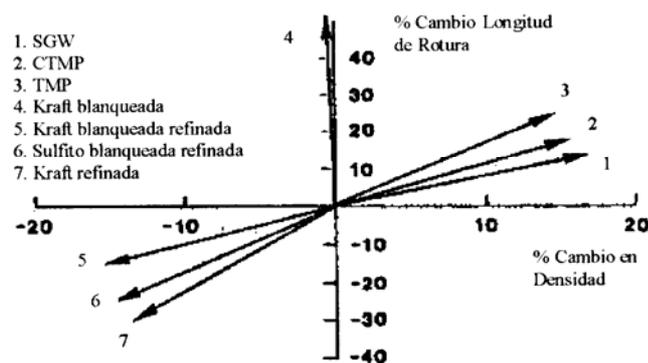
GW: Pulpa mecánica a la piedra  
CP: Pulpa química  
N.A: No aplicable

## 2.4 EFECTOS DEL RECICLADO SOBRE LAS PROPIEDADES.

### 2.4.1 Introducción.

El reciclado sucesivo al que pueden someterse a las fibras de diferentes tipos de pulpas influye notablemente en las propiedades de los papeles obtenidos, en la figura 2.19 puede observarse precisamente el efecto del número de ciclos de reciclado sobre la longitud de rotura y densidad para diferentes tipos de pulpas, las flechas indican la dirección en la cual se incrementa el número de ciclos (13).

Las direcciones de los cambios de las propiedades en las pulpas mecánicas y químicas son opuestas (13, 78).



**Figura 2.19 Efecto del número de ciclos de reciclado sobre la longitud de rotura y densidad.**

Los cambios que se registran en las propiedades sin lugar a dudas se deben a modificaciones que se registran en las propiedades de las fibras, las variaciones son mucho más significativas en los primeros dos ciclos, atenuándose en los ciclos subsiguientes (13)

Hay muchas causas sobre los efectos del reciclado, pero siempre hay una dominante en cada tipo de pulpa. En las pulpas químicas batidas hay pérdidas en el hinchamiento; en las pulpas mecánicas el estiramiento y flexibilización de las fibras; y en las químicas blanqueadas la remoción del rizado de las fibras (13)

Además, muchos estudios concuerdan que los aspectos que influyen sobre las propiedades de los papeles hechos con fibras secundarias son (79):

- ✓ Resistencia de las fibras.
- ✓ Longitud de las fibras.
- ✓ Hinchamiento o plasticidad de las fibras.
- ✓ Potencial de enlace de las fibras.

La resistencia de las fibras usualmente se determina por la medición de la longitud de rotura zero-span efectuada sobre hojitas, sin embargo, no está suficientemente clarificada la magnitud con la cual esta propiedad es afectada por el secado (79).

En el caso de las fibras vírgenes es conocido que la longitud de las mismas es importante en lo que hace a las propiedades resistentes del papel. El reciclado hace que por un lado las fibras se tornen más rígidas, las que en un posterior proceso de refinado terminan siendo acortadas (79).

El hinchamiento/plasticidad de las fibras es uno de los parámetros involucrado en el enlace fibra-fibra; indica como estarán conformadas entre ellas, lo que identifica el área de unión relativa. Las fibras secundarias tienen una conformabilidad menor que las vírgenes (79).

El potencial de enlace de las fibras es el otro parámetro con peso en el enlace fibra-fibra, representa la fuerza específica de unión. El mecanismo de enlace fibra-fibra se efectúa mediante enlaces de puente de hidrógeno, el secado sucesivo de las fibras durante el reciclado deteriora significativamente la capacidad de unión mediante este tipo de enlaces (79).

Evidentemente, las fibras sufren modificaciones en sus propiedades durante el proceso de recuperación de las mismas, a continuación se clasifican las propiedades y se indican cuales son las operaciones unitarias que influyen sobre ellas (79):

- ✓ Modificación de las dimensiones de la fibra: considera la longitud individual de la fibra como así también el área de sección transversal, estas pueden ser afectadas por las operaciones de:

Desintegración o pulpado del papel.

Dispersión.

Refinación.

El efecto más importante es la disminución de la longitud individual de la fibra por corte, como también un descenso en el área de sección transversal como consecuencia de desprendimientos de material de las fibras.

- ✓ Modificación de las propiedades de superficie de la fibra: existen básicamente tres aspectos que las alteran:

Blanqueo de la fibra: el proceso modifica la superficie química de misma.

Aditivos: son productos químicos agregados para modificar las propiedades superficiales.

Contaminantes: el impacto se debe a ciertos productos de bajo peso molecular que pueden ser depositados sobre las fibras durante el proceso de pulpado, alterando su química.

- ✓ Cambios en la distribución de las propiedades de la fibra: muchas de las operaciones unitarias fraccionan las fibras, como así también las partículas más densas son eliminadas en los sistemas de depuración. Por ejemplo, la unidad de flotación puede eliminar finos y la máquina de papel separa las fibras intactas de los finos. Por lo tanto, la naturaleza del flujo de ingreso de fibras a la máquina papelera depende de las operaciones del proceso de elaboración del papel. Las operaciones más usuales son las que se llevan a cabo en: clasificadores probabilísticos, depuradores, células de flotación y en la máquina de papel.

- ✓ Modificaciones en la morfología de la fibra: esta relacionada a la estructura mecánica de las fibras individuales. La presencia o ausencia de pared primaria, naturaleza de la fibrilación, y la unión entre las cadenas de microfibrilas dentro de la pared celular, dependen de las variables del proceso. La morfología de la fibra puede ser afectada por las operaciones de: desintegración, refinación, blanqueo y secado.

De todas las operaciones, el secado es el que provoca el efecto más profundo, causa el colapso irreversible de la pared celular (hornificación) que conduce al desarrollo de defectos en la estructura

de la misma. Debido a esto, las fibras se fracturan con mayor facilidad cuando pasan por ejemplo por un refinador.

## **2.4.2 Propiedades.**

### **2.4.2.1 Densidad.**

Tanto la densidad como su inversa, el volumen específico (bulk), es un excelente indicador del grado de compactación de las fibras, del coeficiente de dispersión de la luz, del área de enlace relativa de las fibras (RBA), y la facilidad de drenaje de la pulpa en la máquina de papel (80). La densidad para una pulpa no tratada es función de las dimensiones de la fibra como así también de su flexibilidad o facilidad de colapsarse (81).

La comparación de hojitas de pulpa kraft y sulfito de la misma madera indica que las últimas son más densas, esto se debe a que el proceso origina fibras más flexibles o que pueden colapsarse mejor durante el secado (81).

Cuando una pulpa se somete a un refinado, la densidad del papel aumenta a medida que el proceso avanza. Clark encontró que las resistencias a la tracción y explosión son linealmente proporcionales a la densidad, mientras que la resistencia al rasgado a partir de un cierto valor máximo es inversamente proporcional a la densidad. La porosidad también es inversamente proporcional a la densidad (82).

Sin embargo, hay dos situaciones en las cuales el aumento de densidad no lleva aparejado un incremento proporcional en la resistencia a la tracción y explosión: el calandrado, y el agregado de cargas (82).

Por otra parte, se ha observado una fuerte correlación entre la densidad de las hojitas y el índice de enlace derivado de las determinaciones del coeficiente de dispersión de la luz. Es probable que el aumento de la densidad debido al tratamiento mecánico se deba en primera medida al cambio de flexibilidad y capacidad de colapsamiento de las fibras como resultado de trastornos en la estructura interna de

la fibra por el aplastamiento. Después del colapsamiento los cambios en la densidad están mas bien relacionados a un incremento en el área de enlace sin que ello signifique un aumento real en el grado de enlace (81).

El efecto del número de ciclos de reciclado de una pulpa kraft no blanqueada sobre la densidad indica que la misma desciende en un 5% después del primer ciclo, y un 13% en el sexto. Si todos los repulpados se llevan al mismo grado de refinado, la caída de la densidad en cada ciclo puede tomarse como una medida de la disminución de la capacidad de enlace (83). De igual manera, si las pulpas refinadas entre ciclos se comparan a igual longitud de rotura, la densidad no registra cambios importantes (84).

Cuando en las pulpas kraft no blanqueadas se observa un incremento de la densidad, esta puede deberse al mayor colapsamiento de las fibras y mayor capacidad de enlace de los finos sobre la superficie de las fibras (8).

En general se puede concluir que la densidad para la mayoría de las pulpas químicas disminuye con el reciclado (13, 78; 83, 84, 85).

Para las pulpas mecánicas, se puede establecer que el efecto de los reciclados sucesivos terminan incrementando la densidad (8, 13). El aumento de densidad en las pulpas TMP se debe probablemente al colapsamiento de las paredes de la fibra como resultado de los diferentes ciclos, lo que lleva a un incremento en la densidad específica de la fibra y flexibilidad de la fibra húmeda. Por otra parte, las paredes heterogéneas de las fibras TMP, relativamente ricas en lignina si se comparan con las de pulpas de bajo rendimiento, impiden la recuperación de la estructura original de la fibra después del proceso de fabricación del papel (8).

Experiencias realizadas con pulpas mecánicas (SGW) en las que se desecharon los finos (porción menor a la malla 150), muestran que la densidad aumenta con los distintos reciclados, casi un 14% al quinto ciclo. No obstante dichos valores son menores a los determinados a las mismas pulpas con los finos, que a su vez no presenta cambios en el primer ciclo (78).

densidad y de menor porosidad, coeficiente de dispersión de la luz y opacidad. La resistencia de enlaces entre fibras es mejorada, pero la longitud y resistencia intrínseca de las mismas se reducen sobre todo al extremar el tratamiento mecánico. En cambio, en las pulpas mecánicas, el refinado produce un efecto diferente, debido a las características de las fibras que tienen un alto grado de lignina y en consecuencia son más rígidas y frágiles. El principal efecto es la reducción de tamaño, con lo cual los fragmentos contribuyen a un incremento del área superficial y densidad de la hoja, en consecuencia hay un mejor contacto entre fibras que mejora los enlaces y resistencia. Debido a la naturaleza rígida de los fragmentos de las fibras de la pulpamecánica, la reducción de tamaño de las fibras no necesariamente disminuye las propiedades resistentes como se presenta en las pulpas químicas (88).

En general el refinado de pulpas mecánicas trae aparejado un incremento en el coeficiente de dispersión de la luz y opacidad.

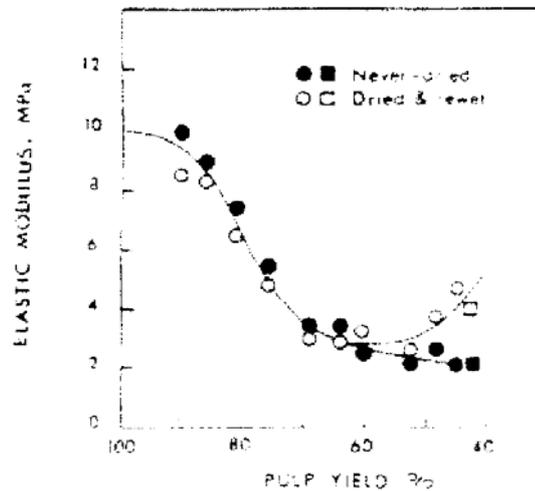
Experiencias hechas con pulpas kraft blanqueadas secas, remojadas y posteriormente refinadas, demuestran que el módulo de elasticidad disminuye con el incremento del número de vueltas del equipo utilizado, esta disminución se debe fundamentalmente a que la acción produce una fibra más deformada (89).

Por otra parte el refinado mueve tanto el hinchamiento como el módulo elástico a valores de la fibra nunca secada, por lo que es de esperar que la acción de batido de las pulpas de bajo rendimiento recicladas sirva para recuperar parcialmente las propiedades, mientras que a medida que se aumenta el rendimiento la recuperación del módulo elástico es mejor (89, 90).

En la figura 2.21 se muestra la variación del módulo de elasticidad con el rendimiento de pulpas kraft secadas y remojadas y nunca secadas, del gráfico se desprende que para las pulpas recicladas la variación del módulo es particularmente significativa a bajos rendimientos (89).

Las propiedades resistentes de papeles de diario y ledger destintados, como así también las de cartones corrugados usados, pueden mejorarse significativamente cuando se refinan a baja consistencia. Cuando se refina OCC a baja consistencia se

consume menos energía y se obtiene mejores resultados en el desarrollo de propiedades resistentes (17).



**Figura 2.21 Variación del módulo de elasticidad con el rendimiento de la pulpa (89)**

El Shopper de pulpas kraft no blanqueadas cae significativamente durante los sucesivos reciclados (83).

Para las pulpas mecánicas y alto rendimiento el Shopper disminuye en los distintos ciclos, pero es mucho más evidente el cambio en el primer reciclado, donde la hornificación en el primer secado es la causa principal (14).

Experiencias realizadas con pulpas mecánicas (GW) en las que se desecharon los finos y astillas (porción menor a la malla 150), muestran que el Shopper aumenta levemente con los distintos reciclados. No obstante dichos valores son menores a los determinados a las mismas pulpas con los finos, que a su vez no presenta cambios en el primer ciclo (78).

#### **2.4.2.3 Grado de Retención de agua.**

La determinación del grado de retención de agua (WRV) es una medida satisfactoria de la capacidad de absorción de agua con aumento de volumen de las fibras (hinchamiento) (swelling). A su vez, la capacidad de absorción de agua de las

fibras está íntimamente relacionada con la capacidad de desarrollo de propiedades resistentes del papel. En consecuencia, el grado de retención de agua termina siendo uno de los mejores indicadores para evaluar el grado de refinado de una pulpa(87).

La hornificación es el principal responsable de la pérdida de la capacidad de absorción de agua de las paredes de las fibras; esto se debe al efecto de los sucesivos ciclos de remojado y secado, que conducen a una mayor rigidez de las fibras y a una disminución de la capacidad de enlace inter fibras (91).

El mecanismo propuesto para la hornificación considera que se produce un aumento en los enlaces transversales entre las microfibrilas debido a enlaces del tipo hidrógeno producidos durante el secado, los que no pueden romperse en posteriores remojados debido precisamente a la inaccesibilidad del agua en esos puntos (10, 91).

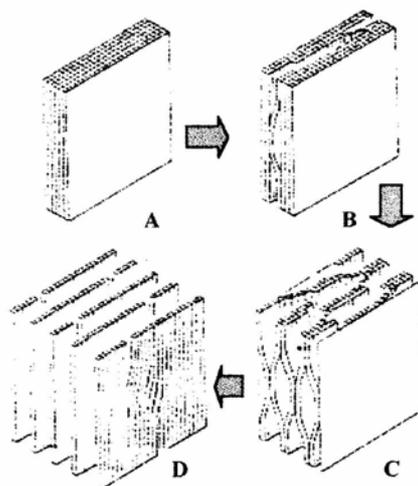
En la figura 2.22 se presenta el mecanismo adoptado por Scallan para explicar la evolución del hinchamiento y también la hornificación (92).

En la figura 2.22 el estado A representa un paquete de microfibrilas en estado libre de agua, tanto el estado B como C representan un estado de hinchamiento intermedio, alcanzándose el estado D por un posterior hinchamiento y rotura de todos los enlaces radiales, en el que la pared se encuentra concéntricamente delaminada (92).

El modelo también permite relacionar al estado B y al C a un estado intermedio de hinchamiento de las fibras después del pulpado, si las fibras se secan la estructura se mueve al estado A, sin embargo si se refinan es de esperar que se pase a la estructura D (92).

Se ha observado que cuando las fibras secas se remojan, presentan un punto de saturación de las fibras (PSF) menor y poros más pequeños comparando con fibras que nunca fueron secadas. Esta situación sería asimilada a la estructura B de la figura 2.22, donde no se pueden romper todos los enlaces formados durante el secado. Cuando las fibras remojadas se refinan, el punto de saturación puede superar

al valor de las fibras nunca secadas, en este caso el tamaño de los poros se incrementa proporcionalmente y la estructura de las paredes pasa al estado D (92).



**Figura 2.22 Modelo adoptado para explicar hinchamiento y hornificación.**

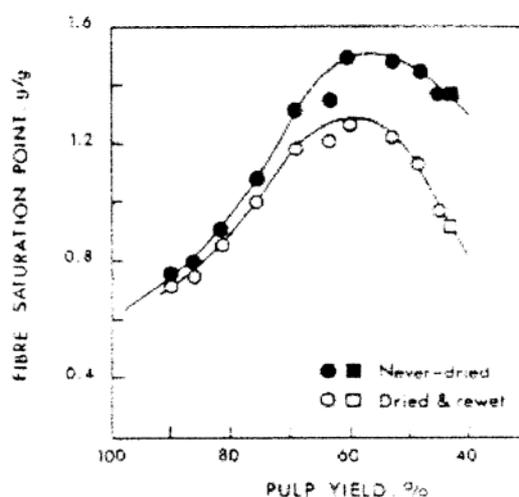
En realidad los enlaces transversales entre microfibrilas se pueden deber a enlaces de hidrógeno entre los puntos en contacto, y al mismo tiempo a una mezcla de enlaces covalentes e hidrogeno en la estructura del gel lignina-hemicelulosa. Las modificaciones que se pudieran producir en estos enlaces se traducen en cambios en el módulo de elasticidad (89).

Se ha llegado a la conclusión que la hornificación irreversible es una característica de las pulpas de bajo rendimiento (8, 14, 89, 91). En las pulpas de alto rendimiento, la presencia del gel lignina-hemicelulosa previene el contacto directo entre las superficies de las paredes celulósicas de las fibras durante el secado, con lo cual los enlaces de tipo puente de hidrógeno se reducen (14, 89, 91).

En la figura 2.23 se presenta para pulpas kraft, la variación del punto de saturación de la fibra en función del rendimiento de la pulpa, tanto para pulpas nunca secadas como secadas y remojadas. Se puede observar del gráfico que a bajos rendimientos (menores al 65%), la hornificación es irreversible (89).

Por lo general, las pulpas kraft muestran con el reciclado una disminución muy pronunciada del punto de saturación de las fibras (8, 89, 93), la que es menor para las pulpas kraft y al sulfito refinadas (13).

En las pulpas de muy alto rendimiento el reciclado reduce significativamente el punto de saturación de las fibras (8, 93). Las pulpas termomecánicas muestran una variación muy pequeña o nula (9, 93)



**Figura 2.23 Variación del PSF con el rendimiento de la pulpa (89)**

Si tomamos en cuenta que los valores de las determinaciones del WRV pueden considerarse como una aproximación a los del PSF (94), puede hacerse el análisis de la variación de los mismos durante el reciclado.

Para las pulpas kraft no blanqueadas recicladas, el WRV disminuye con los ciclos, siendo más pronunciado el cambio en los dos primeros ciclos (83, 95).

Las pulpas kraft con los distintos reciclados, muestran una mayor disminución en el punto de saturación de las fibras que las pulpas de ultra alto rendimiento, mientras que las pulpas TMP son las que presentan la menor variación (8).

Las pulpas kraft presentan una ajustada relación lineal entre la longitud de rotura y el punto de saturación de la fibra, con un  $R=0,9698$  (8).

Para las pulpas termomecánicas pulpadas en agua se observa un aumento en el WRV con el número de ciclos; sin embargo, el incremento en el WRV se ve mucho más beneficiado por el pulpado en medio alcalino (hidróxido de sodio). Estos cambios en el WRV están relacionados linealmente con los grupos carboxilo de las pulpas con un factor  $R=0,849$  (96).

Sin embargo, también estudios realizados con pulpas termomecánicas y químitermomecánicas de álamo indican que el WRV sufre una caída abrupta en el primer reciclado, manteniéndose constante en los siguientes, siendo la causa principal la hornificación en el primer secado (14).

Ha sido demostrado que las pulpas de tipo kraft blanqueadas y recicladas, pueden recuperar con el refinado casi un 100% del valor del WRV de las pulpas vírgenes, esta recuperación se logra con mejores resultados a altos rendimientos de la pulpa (91).

Por otra parte, la recuperación del WRV de las pulpas recicladas depende en primer lugar de la temperatura de secado y condiciones: secado libre o restringido. Cuando el secado se realiza a mayor temperatura la recuperación del WRV a los valores originales se hace más difícil por la hornificación. El secado restringido conduce a valores del WRV menores que cuando el mismo se lleva a cabo libremente (97).

#### **2.4.2.4 Porosidad.**

La porosidad de una hoja está influenciada por la estructura y tipo de fibras, por la presencia de otros tipos de componentes (cargas, encolantes, etc.), como así también por la formación de la hoja y grado de compactación por prensado y calandrado. La permeabilidad determinada por la resistencia al flujo de aire a través de la estructura del papel es una medida aproximada de la porosidad (98).

La resistencia al aire del papel se incrementa con la fracción de sólidos del mismo. Su determinación da una indirecta correlación entre la porosidad, formación y resistencia del papel. Normalmente la resistencia esta directamente relacionada con la porosidad (82).

Para las pulpas kraft sin blanquear y refinar se observa un incremento del orden del 4% en la porosidad después de cuarto reciclado. Las pulpas termomecánicas también sin blanquear y refinar muestran una caída del 48% en la porosidad al cuarto ciclo. Para las pulpas de ultra alto rendimiento al sulfito no blanqueadas ni refinadas, se puede establecer que no se observan cambios significativos en la porosidad como consecuencia del reciclado (93).

Experiencias con pulpas SGW, TMP, CTMP y mezclas 50/50 TMP/kraft blanqueada batida, han demostrado que todas registran una disminución en la porosidad como desenlace de los sucesivos reciclados (13).

En las pulpas químicas recicladas, del tipo kraft y al sulfito blanqueadas y refinadas, se han registrado importantes aumentos en la porosidad en función de los ciclos a los que se someten las fibras (13).

#### **2.4.2.5 Resistencia a la Tracción.**

La resistencia a la tracción es una medida directa de la resistencia del papel a la tensión, se define como la fuerza requerida para romper un papel de ancho y longitud determinadas. Es un test de rutina en la industria papelera, presenta valores diferentes en la dirección de la máquina de papel y en la dirección transversal a la misma (82).

La resistencia a la tracción usualmente se informa como longitud de rotura en metros (81).

Numerosos estudios han demostrado que existe una muy precisa relación lineal entre la resistencia a la tracción y a la explosión, independientemente del tipo de fibra o método de tratamiento mecánico al que se someten a las fibras (81).

Las propiedades resistentes de la estructura de la hoja de papel dependen de las resistencias individuales de las fibras y de los enlaces entre ellas. Durante la primera etapa del refinado, es probable que la resistencia de la hoja sea una función de los enlaces entre fibras; sin embargo si el refinado continúa, el aumento de la resistencia a la tracción y explosión puede considerarse como una función de la resistencia de la fibra. También se ha encontrado que hay pérdidas en la resistencia a la tracción con el refinado a altos grados de enlace entre fibras (81).

Durante la primer etapa del tratamiento mecánico, todas las pulpas muestran una relación lineal entre resistencia a la tracción e índices de enlace, tales como opacidad y coeficiente de dispersión de la luz (81).

Numerosos estudios han demostrado que la longitud de las fibras tiene muy poco efecto sobre las propiedades resistentes de la hoja. El cambio en la distribución de longitud de fibras que se produce durante el tratamiento mecánico, no tiene efectos significativos sobre las propiedades resistentes (81).

Los sucesivos reciclados afectan la resistencia a la tracción, los cambios más significativos se dan en los dos primeros ciclos (83).

En las figuras 2.24 y 2.25 se muestra para pulpas mecánicas y químicas, la relación entre la densidad y resistencia a la tracción para hojas durante el reciclado (13). La dirección de la flecha indica el incremento del número de ciclos, al mismo tiempo es interesante observar el comportamiento opuesto de las pulpas químicas frente a las mecánicas.

El la disminución en la longitud de rotura en seis ciclos de reciclado comparados a igual nivel de refino, es mucho más pronunciado para pulpas al sulfito blanqueadas (-75%) que para las no blanqueadas (84).

Experiencias con pulpas kraft demuestran que la resistencia a la tracción de las mismas disminuye con los sucesivos reciclados (13, 83, 85, 95).

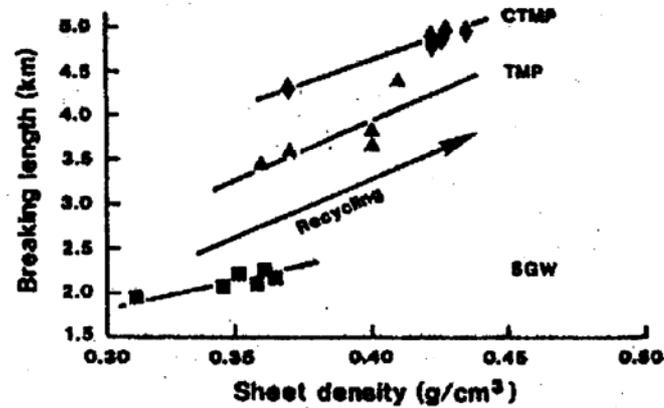


Figura 2.24 Resistencia a la tracción en función de la densidad durante el reciclado para pulpas mecánicas (13).

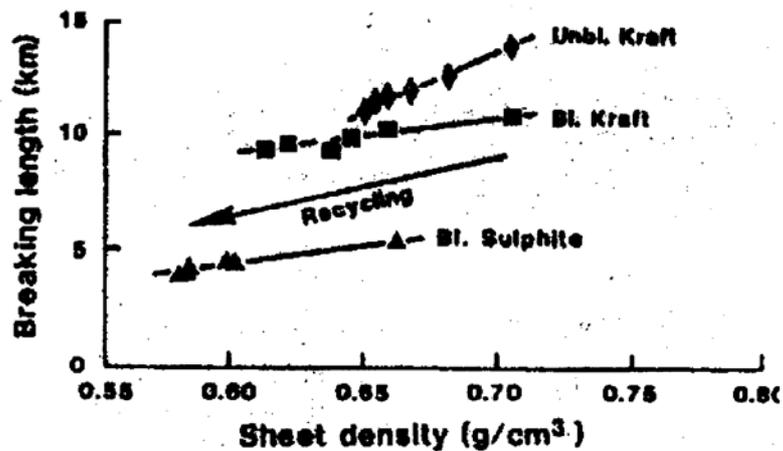


Figura 2.25 Resistencia a la tracción en función de la densidad durante el reciclado para pulpas químicas batidas (13).

Pulpas mecánicas (SGW) en las que se desecharon los finos (porción menor a la malla 150), muestran que la longitud de rotura aumenta con los distintos reciclados en casi un 30% en el primer ciclo, mientras que las mismas pulpas con finos incluidos acrecientan el valor de la longitud de rotura en solo un 22% al cabo del primer ciclo. Comparativamente, las pulpas ensayadas con los finos incorporados presentan valores de la longitud de rotura superiores respecto a las sin los finos(78).

#### **2.4.2.6 Resistencia a la Explosión.**

La resistencia a la explosión se determina sujetando una muestra de papel sobre un diafragma de goma, sobre el que se aplica una presión a velocidad constante, se informa la presión a la que el papel revienta.

En la industria papelera, este test no distingue diferencias entre los valores obtenidos en la dirección de la máquina (MD) y en la dirección transversal (CM) (82).

En el apartado 2.4.2.5 se ha mencionado la estrecha relación que existe entre la resistencia a la explosión y tracción (81). Por lo que es de esperar que las tendencias indicadas para la resistencia a la tracción sean las mismas para la explosión, como así también las causas que las originan.

En consecuencia, la resistencia a la explosión depende básicamente de la longitud de la fibra y de los enlaces interfibras. Incrementando la longitud de fibra aumenta la resistencia a la explosión, pero los enlaces entre las fibras son los que más afectan esta propiedad. En consecuencia, el refinado aumenta esta propiedad hasta cierto punto, luego del cual un batido adicional no la modifica significativamente, fundamentalmente por el grado de deterioro de las fibras. El aumento de densidad de las hojas por la aplicación de presión en húmedo reduce la resistencia a la explosión (82).

La resistencia a la explosión puede tomarse como una propiedad interna de la hoja, por lo que es ampliamente influenciada por la superficie de enlace. Las condiciones de secado y los cambios en el gramaje de las hojas son las causas más comunes que afectan la resistencia a la explosión (82).

Con los distintos reciclados la resistencia a la explosión de las pulpas químicas disminuye (13, 78, 83, 85), mientras que para las mecánicas aumenta (13, 78, 96).

---

Sin embargo, hay investigadores que han reportado para pulpas mecánicas de álamo pérdidas en la resistencia a la tracción y explosión, más evidentes en el primer reciclado, excepto para las TMP que prácticamente no presenta cambios. Estas contradicciones con otros trabajos estarían sugiriendo que la historia de las pulpas es un factor a tener en cuenta (14).

Las pulpas mecánicas (SGW) en las que se desecharon los finos (porción menor a la malla 150), muestran que la resistencia a la explosión aumenta con los distintos reciclados en casi un 40% en el primer ciclo, mientras que las mismas pulpas con finos incluidos acrecientan el valor de la resistencia a la explosión en solo un 7% al cabo del primer ciclo. Comparativamente, las pulpas estudiadas con los finos incorporados tienen valores de la resistencia a la explosión superiores frente a las mismas sin los finos (78).

#### **2.4.2.7 Resistencia al Rasgado.**

La resistencia al rasgado se determina mediante un péndulo que continúa el desgarramiento previamente iniciado de una muestra de papel, la pérdida de energía está relacionada con la resistencia a medir.

La resistencia al rasgado puede considerarse que es la suma del trabajo para arrancar las fibras y el necesario para cortar las mismas en la línea de desgarramiento (81). El trabajo necesario para cortar las fibras normalmente es menor al necesario para arrancarlas (80).

La resistencia al rasgado depende de: 1) total de fibras que participan en la ruptura de la hoja; 2) longitud de la fibra; 3) número y resistencia de los enlaces entre fibras (82).

Cuando una pulpa se refina, la resistencia al rasgado sube hasta un máximo y luego desciende en la medida que el refinado avanza. La primera etapa está más bien asociada al incremento en capacidad de enlace (81). Después del máximo, la reducción de la resistencia al rasgado por un refinado adicional, provoca un aumento en la densidad y reduce la longitud de las fibras, con lo cual las mismas se fijan más

firmemente en la estructura de la hoja, y en consecuencia, estas fibras durante el rasgado son cortadas en lugar de ser arrancadas, acción que se lleva a cabo con un menor trabajo (80).

Para las pulpas kraft no blanqueadas se reporta un incremento en la resistencia al desgarro en función del número de repulpados; la disminución de la densidad y el grado de enlaces entre fibras en cada ciclo serían los responsables del aumento de la resistencia al rasgado (83, 85, 95). También se han reportado aumentos de la propiedad en pulpas kraft blanqueadas y refinadas y al sulfito blanqueadas y refinadas (13, 95).

Para las pulpas mecánicas, para la mayoría de los casos se han registrado aumentos en la resistencia al desgarro en los tres primeros reciclados (13, 14, 78, 96), que se deben fundamentalmente a la caída del potencial de enlace; en algunos casos a partir del tercer ciclo se han determinado caídas en la propiedad, que no han podido ser explicados como consecuencia de un acortamiento de las fibras por el proceso, ya que en las investigaciones no se registraron cambios importantes en la longitud de las fibras (14).

Investigaciones llevadas a cabo con pulpas mecánicas (SGW) en las que se desecharon los finos (porción menor a la malla 150), muestran que la resistencia al rasgado aumenta con los distintos reciclados en casi un 45% en el primer ciclo, y luego el valor disminuye hasta que al cuarto ciclo el aumento es de un 36% respecto a las condiciones iniciales. Las mismas pulpas con finos incluidos no muestran cambios en la resistencia al desgarro al cabo del primer ciclo. Comparativamente, las pulpas investigadas y ensayadas con los finos incorporados presentan valores de la resistencia al desgarro prácticamente iguales frente a las mismas sin considerar los finos (78).

#### **2.4.2.8 Resistencia a la Compresión.**

Numerosos métodos de ensayos para determinar la resistencia a la compresión se han desarrollado; sin embargo, se impone el ensayo o test de compresión en tramo corto (STFI).

El ensayo se basa en la hipótesis de que la compresión del material al ensayar ocurra antes que el pandeo, para ello dos mordazas muy próximas sujetan el material a ensayar y lo comprimen en un tramo muy corto (1 mm) que evita el pandeo, registrando automáticamente el valor de la resistencia (99).

Las fallas a la compresión en ensayos STFI han demostrado que se deben a la carga inestable sobre la red fibrosa. Dos posibles mecanismos se han sugerido para explicar las fallas: a) pandeo de los segmentos de fibra, preponderante en hojas de baja densidad; b) dislocaciones de las paredes de las fibras causadas por el fluir de microfibrilas, predominantes en hojas de media y alta densidad. En las dos alternativas, la cantidad de dislocaciones de fibra aumenta con la compresión, hasta que la hoja completa se torna inestable y se colapsa (100).

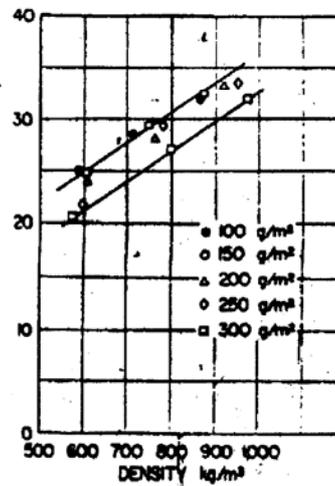
En el ensayo de tracción las fibras se desprenden y fracturan, mientras que en el de compresión las paredes de las fibras se pandean y conducen a la muestra al colapso. La resistencia a la compresión del papel es del orden del 30% de la resistencia a la tracción. La deformación hasta la falla por compresión es 1/10 de la que se registra para la tracción (100).

En general, el aumento del rendimiento de una pulpa aumenta la relación (Resistencia al Compresión)/(Resistencia a la Tracción). Para la compresión, el alto contenido de lignina puede evitar el movimiento de las microfibrilas en las paredes de la fibra, con lo que la fibra es más estable. A altos contenidos de celulosa las microfibrilas pueden moverse dentro de la pared, y las dos resistencias pueden igualarse (100).

Para hojitas pulpas kraft sin blanquear de distintos gramajes se ha demostrado que existe una relación lineal entre el índice de compresión del método STFI y la densidad, tal como se presenta en la figura 2.26 (99).

Estudios realizados sobre la refinación de OCC indican que el valor del STFI aumenta con la energía consumida; no obstante, la refinación a baja consistencia permite obtener valores de resistencia a la compresión con mucho menos consumo de energía que la operación a alta consistencia (17).

---



**Figura 2.26** Índice de compresión (kNm/kg) en función de la densidad para el método STFI (99).

#### 2.4.2.9 Propiedades ópticas.

El blanco es una medida de la reflectividad porcentual del papel con relación a un patrón.

La opacidad es una propiedad fundamental para los papeles de escritura e impresión. Un papel opaco es aquel que presenta dificultad para ver a través de él (101).

La opacidad aumenta con el gramaje y es fuertemente influenciada por la reflectividad del papel, un papel puede ser opaco por tener alta superficie específica o por ser más oscuro y absorber la luz (101).

El coeficiente de dispersión de la luz es proporcional a la superficie específica ópticamente activa del papel (101).

Para la mayoría de las pulpas, la reducción en el coeficiente de dispersión de la luz por el incremento de los enlaces es más importante que el aumento de esta

propiedad debido al desarrollo de la superficie específica, por lo que el refinado reduce la opacidad para la mayoría de las pulpas (102).

Para las pulpas químicas, el refinado reduce el coeficiente de dispersión de la luz y la opacidad, ocurriendo lo contrario en pulpas mecánicas.

La teoría de Kubelka-Munk es muy útil para entender las propiedades ópticas, la misma define dos parámetros ópticos  $k$  y  $S$ , independientes entre sí y del gramaje del papel;  $k$  es el coeficiente específico de absorción de la luz y  $S$  el coeficiente específico de dispersión de la luz (101).

La reducción de  $k$  a  $S$  constante (blanqueo), aumenta el blanco, mientras que una reducción de  $S$  por densificación del papel (refino), reduce el blanco (101).

El coeficiente de dispersión de la luz es mayor en las hojas más voluminosas que en las más densas. Durante el reciclado de pulpas químicas la hornificación produce hojas con porosidad superior a las nunca secadas y recicladas, por lo que el coeficiente es mayor. Las pulpas de TMP de álamo suben muy levemente el coeficiente de dispersión con los reciclados, debido a que exhiben una pequeña caída en la densidad; mientras que las TMP de píceas muestran un comportamiento opuesto, debido a que éstas aumentan su densidad y mejoran los enlaces entre fibras y finos a medida que se van reciclando (14, 96).

Experiencias con pulpas mecánicas (SGW) de píceas en las que se desecharon los finos (porción menor a la malla 150), muestran que el coeficiente de dispersión de la luz aumenta levemente con los distintos reciclados, casi un 6% al segundo. Para las mismas condiciones, el blanco disminuye, siendo más significativo el cambio en los dos primeros reciclados; el blanco con los finos es prácticamente igual al valor registrado sin los mismos (78).

El coeficiente de dispersión de la luz para pulpas TMP, SGW, CTMP, disminuye a través de los sucesivos reciclados; mientras que para las pulpas kraft y sulfito blanqueadas y refinadas se presenta la situación opuesta (13).

---

Para las pulpas kraft no refinadas ni blanqueadas se observan una caída muy pronunciada en el coeficiente de dispersión de la luz en el primer reciclado, debido probablemente al mayor colapsamiento de las fibras y enlaces de los finos presentes sobre las superficies de las mismas (8).

La opacidad de una pulpa kraft blanqueada reciclada aumenta con el refinado, inversamente a lo que ocurre con una pulpa virgen (83).

El blanco de pulpas TMP de píceas desintegradas en agua, cae con los diferentes reciclados, debido probablemente a los efectos térmicos en el pulper (70°C) y al proceso de fabricación de las hojitas, también la absorción de hierro contenida en el agua puede ser la causante de la modificación de esta propiedad (96).

---