

ANÁLISIS DE LOS COSTOS DE PRODUCCIÓN DE PULPA DE CELULOSA: MÉTODOS KRAFT Y MECÁNICO

Rolón, Jazmín; Mués C. Federico; Rodríguez, María Elvira; Tucci, Víctor; Rodríguez, María Analía

Facultad Regional Santa Fe, Universidad Tecnológica Nacional. Lavaise 610 (3000) Santa Fe, Argentina jazmin_rolon@live.com.ar; fede.mues@gmail.com; elvi2003@hotmail.com; ingvtucci@gmail.com; r_analia@santafe-conicet.gov.ar

RESUMEN

En la industria de la celulosa, son múltiples los métodos de producción dependiendo del tipo de papel que se quiera obtener así como de los recursos disponibles u otras restricciones. Antiguamente solo se producía pasta a partir de la abrasión mecánica y la aplicación de procedimientos químicos a base de soda cáustica, sulfitos y sulfatos. Hoy en día, dentro de los más utilizados, se continúa con el método mecánico para la fabricación de pulpa que luego se usa en papeles de menor calidad. Además se emplea el proceso químico Kraft para la obtención de pulpa que se destina a papeles que requieran mejores características. Este último representa un 72% de la producción mundial de celulosa, mientras que el primero sólo 20%.

El objetivo del proyecto en el cual se incluye el presente trabajo es la optimización de la cadena de suministro de la celulosa y el papel. En general, los modelos matemáticos suponen costos con escaso grado de detalle y precisión como datos de entradas del problema por optimizar. Sin embargo, para mejorar la calidad de las soluciones obtenidas, es de vital importancia contar con datos certeros de los costos operativos y de inversión. Cabe destacar que el componente principal del papel son las fibras de madera y que éstas para ser utilizadas deben ser primero procesadas para la obtención de celulosa. Por lo tanto, se decide llevar a cabo un análisis de los costos de producción de los métodos mecánico y Kraft para la elaboración de pulpa de papel.

En primera instancia, para cada alternativa se efectúa un estudio detallado de las actividades que conforman el proceso productivo, considerando los recursos que deben ser empleados. A partir de esto, se proponen ecuaciones del cálculo de costos de dichas actividades y se analizan los resultados obtenidos.

Palabras claves: Celulosa, Método Kraft, Método Mecánico, Costos, Recursos.

ABSTRACT

The paper pulp industry uses different production methods depending on the desired type of paper and on the available resources and other restrictions. In the past, the only method used to produce pulp was through mechanical abrasion and the application of chemical processes based on caustic soda, sulfites and sulfates. Nowadays, the Mechanical Method is one of the most common processes to produce pulp for low quality paper. In addition, the Kraft chemical process is used to obtain pulp for paper requiring better characteristics. The latter represents 72% of the world production of paper pulp, while the former, only 20%.

This work is part of a project which aims at optimizing the supply chain of the pulp and paper industry. In general, the mathematical models imply costs that are not very detailed and precise, as input data in the problem to be optimized. However, in order to improve the result quality, it is highly important to have accurate data of operation and investment costs. Given that wood fibers are the key components of paper and they need to be processed in order to obtain pulp, an analysis of the production cost needed to produce paper pulp is proposed in this article.

Firstly, for every case we study in detail all the activities included in the production process, considering also those resources that are used. Based on this, the cost equations of said activities are proposed and then the results are analyzed.

Key words: Paper pulp, Kraft Method, Mechanical Method, Costs, Resources.

1- INTRODUCCIÓN.

La cadena de suministro forestal posee una alta complejidad debido a que son múltiples actores los que intervienen en la red y existe una amplia gama de conexiones posibles entre las numerosas industrias situadas a lo largo y ancho del país.

La fabricación de pasta, papel y derivados del papel alcanza cifras que sitúan esta industria entre las más grandes del mundo. La tasa de consumo de pasta y papel se ha utilizado como indicador del desarrollo socioeconómico de una nación [1].

Como características del sector se destaca que es considerada como una industria básica porque de ella depende un conjunto amplio de actividades productivas, de capital intensiva por la elevada relación capital y trabajo. Las inversiones en plantas tanto de celulosa como de papel, exigen una alta inversión de capital por unidad de producto. También es considerada una industria pesada por su relación monto de inversión y producto. A su vez, la escala económica mínima de estas plantas requiere un volumen de mercado amplio para justificar una inversión rentable y eficiente [2].

Los costos de construcción de una moderna planta de fabricación de pasta y papel son extremadamente altos de forma que las instalaciones de alta capacidad implican grandes economías de escala [1].

La pulpa es el producto resultante de la separación de los elementos constitutivos de los tejidos vegetales que poseen las fibras [3]. Ésta se puede clasificar según los diversos métodos productivos posibles de llevar adelante en la actualidad a fin de obtenerla.

Dentro de las alternativas tradicionales se encuentran los medios químicos (basados en la utilización del sulfito o en el proceso denominado “*Kraft*” que emplea el hidróxido de sodio y sulfuro de sodio), mecánicos (con el uso de molinos de piedra o refinadores de discos) o por una mezcla de ambos. Estas últimas alternativas pueden ser la termo mecánica o químico-termo mecánica [4], [5], [6].

Como alternativa no convencional se presenta el proceso denominado “*biopulping*” el cual puede definirse como un método biotecnológico, es decir, la bioproducción de pasta celulosa a partir de la acción de hongos de la putrefacción blanca de la madera. Esta opción se caracteriza por ser amigable con el medio ambiente ya que disminuye el uso de sustancias químicas y el consumo de energía [7], [8].

Luego de la producción de la pulpa propiamente dicha, en algunos casos se procede al blanqueo. Los procesos de blanqueo más conocidos son el “*Elemental chlorine free*” (EFC) donde no se utiliza el cloro gaseoso y el “*Total chlorine free*” (TFC), el cual no emplea reactivos clorados como el cloro gaseoso y el dióxido de cloro, sino que es a base de oxígeno. En general en el caso de las pulpas mecánicas se las deja sin blanquear, en cambio en las pulpas químicas es habitual su blanqueo. Esto se debe a las aplicaciones particulares de cada tipo de pulpa: las mecánicas se usan para papel continuo de calidad inferior, papel de diario, papel de escritura, cartón. En el caso de las pulpas químicas sin blanquear se las aplica en la fabricación de papeles de embalaje o en una mezcla con celulosas menos resistentes. La pulpa química blanqueada se requiere para papeles de impresión y de alta calidad [9].

Si bien en la bibliografía existente se encuentran numerosos autores que tratan sobre los diversos procesos productivos de la pulpa de celulosa, tales como los mencionadas anteriormente, se halla escasa bibliografía en referencia a sus costos operativos y de inversión en forma detallada. Así lo sostiene el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación en su Análisis de Diagnóstico Tecnológico Sectorial - Celulosa y papel (2013) “La disponibilidad de información sobre el sector es escasa, y la existente tiene cinco o más años de edición. Cabe reiterar que en el país no existen evaluaciones económicas financieras para esta escala de plantas...”. Otros aspectos a considerar que suman complejidad al estudio de costos en este tipo de producción en el país es el hecho que en el ámbito de la Investigación y Desarrollo para el sector, las instituciones existentes solo remiten a la Universidad Nacional de Misiones (UNAM), la Universidad Nacional del Litoral y al INTI. A su vez, en América Latina, el único país que provee equipos para el sector celulósico es Brasil. Argentina solo cuenta con empresas que ofrecen reparaciones o mantenimiento para las fábricas de papel. Es decir, la información de la oferta de equipos y por tanto el acceso a la tecnología solo es posible acudiendo a los pocos productores mundiales [2].

A pesar de estas dificultades se pueden mencionar ciertos trabajos relacionados indirectamente con el tema a investigar referido a costos en la industria:

Renolfi estudia los costos de producción y su clasificación proponiendo una metodología de cálculo de aplicación a casos de empresas de forestación y aserraderos [10].

Chaikh elabora un proyecto de inversión denominado “Producción de Pulpa de Madera BCTMP (pulpa quimi-termo-mecánica blanqueada)”, el cual consiste en la en la instalación y operación de una planta productora ubicada en Entre Ríos y Corrientes, Argentina, destinada a la producción de papeles, utilizando madera de *Eucalyptus Grandis* [11].

Otro ejemplo es la propuesta de evaluación económica de plantas de tratamiento de efluentes alternativas para la industria de la pulpa y el papel, la cual analiza los costos de inversión, costo de la huella de agua, costos de ingeniería, costos de mantenimiento y operación de la unidad de tratamiento [12].

Además, se estudia la minimización del costo total de secado en un secador de biomasa de lecho compacto operando en planta integrada de pulpa química y papel presentándose un modelo de programación lineal mixto-entera, que incluye costos de capital y operacionales del secador [13].

Se establecen opciones sustentables en la fabricación de pulpa y papel con la evaluación de costos de conservación de energía y reducción de carbono en Estados Unidos. Se evalúan dichos costos aplicando tecnologías de eficiencia energética [14].

Se desarrolla un modelo de optimización multi-objetivo para identificar el mix de suministro que minimice los resultados de la huella de agua y los costos de pulpa química [15].

Se propone una metodología matemática para evaluar el potencial técnico y económico de una producción integrada de bioenergía con plantas de pulpa y papel [16].

La diversidad de tipos de pulpas posibles de obtener y en base a ellas, la heterogeneidad de derivados, productos finales elaborados y aplicaciones, hacen a esta industria altamente atractiva por su gran potencial económico.

Para lograr competitividad es necesario contar con datos certeros de costos y es por ello que se propone un estudio detallado de los costos que se incurren en este nodo de la cadena: la producción de celulosa. Particularmente este trabajo se basa en el estudio de la producción y determinación de costos de la pulpa celulósica obtenida a partir de la madera de *Pinus Elloti*, desde la selección de troncos hasta la obtención de la pasta.

Más allá de las diferencias prácticas existentes entre la producción a través del método químico Kraft y el mecánico, se propone un modelo de costeo general aplicable a ambos casos.

De la experiencia obtenida con el contacto y el intercambio de información con empresas del rubro, se detecta un alto grado de desconocimiento de éstas en cuanto a la valorización y sistematización de sus costos. En general se utilizan estimaciones que simplifican significativamente la realidad productiva y se emplean herramientas informáticas rudimentarias. Es por esto, que se pone en evidencia la necesidad de generar modelos de costos estándares precisos, adaptados a las necesidades específicas de cada industria. La aplicación concreta de estos modelos en empresas industriales tendrá un impacto local y regional significativo permitiéndoles adaptarse mejor a entornos cada vez más dinámicos y posicionarse favorablemente en los mercados competitivos.

2- METODOLOGÍA

En primer lugar se presenta la elección del modelo de costeo y a continuación los diagramas de flujo donde se muestran las secuencias de operaciones. Luego se describen las etapas del proceso productivo que conforman el método mecánico y el método Kraft, con el fin de detallar los mismos. A partir de este estudio se calcula el consumo y el costo de los recursos que son utilizados en ambas alternativas.

2.1 ELECCIÓN DEL MODELO

La elección de un modelo de costos debe reflejar cuáles y cuánto son los factores de sacrificio necesario para obtener los objetivos productivos (pasta de celulosa). Teniendo en cuenta esto, se necesita conocer en líneas generales el proceso productivo y la composición de la estructura de costos de ambos procesos.

Para dar respuesta a cuáles son factores necesarios se debe realizar la elección entre un modelo completo o variable. El primero contempla que tanto los costos fijos como variables se consideran en el cálculo del costo de la pasta de celulosa, y el modelo variable que únicamente los costos variables son realmente necesario para la obtención de la celulosa, y los fijos para el mantenimiento de la estructura.

En cuanto a la respuesta de cuánto de esos factores debe tenerse en cuenta, se puede elegir entre un modelo de costeo normalizado o resultante, donde el modelo normalizado considera que los datos a emplear son los estándares con que se cuenta a priori del período a analizar y el último, que los datos que se utilizan son los reales, obtenidos y tomados una vez que se concluye un período. [17]

Se decide emplear un modelo de costeo completo dado que al analizar la estructura de costos de los procesos, los fijos son lo suficientemente representativos del total y no sería justo tomarlos como costos de mantenimiento de estructura en el período que se analiza y normalizado debido a que resulta más apropiado a los fines de realizar una estimación de los datos.

Dentro de un modelo completo existen varios métodos de asignación de costos fijos, en el presente trabajo se decide emplear un método de costeo completo normalizado por absorción, debido a que los procesos productivos son totalmente diferentes entre sí, por lo cual se puede

asumir que los costos fijos son directos a cada objeto de costo y además los resultados que se pueden obtener con este estudio son suficientes en esta primera instancia de investigación.

2.2 Diagramas de flujo

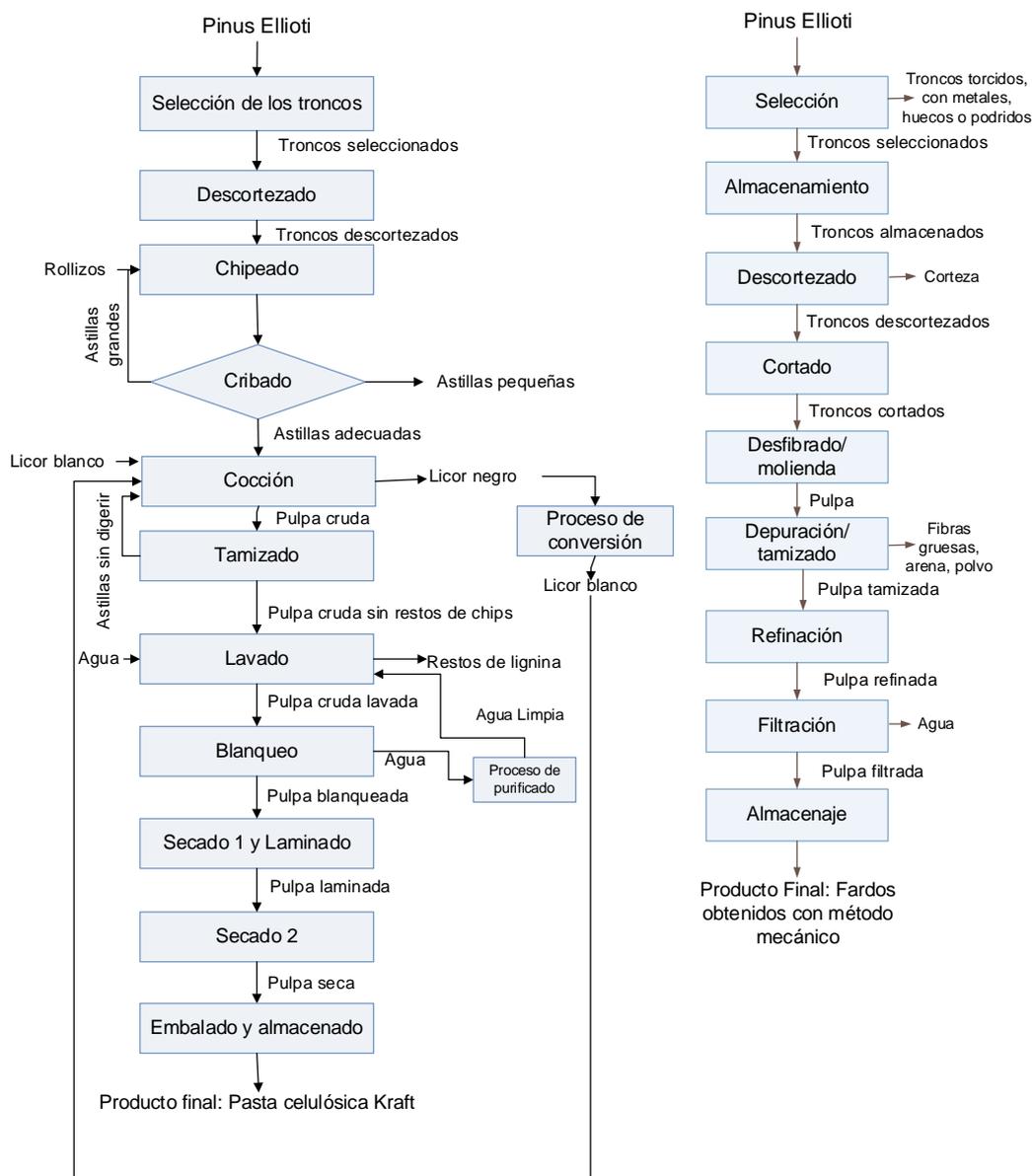


Figura 1: Diagrama de flujos de ambos procesos

2.3 Método mecánico

El método mecánico es el primer método inventado para la fabricación de pulpa celulósica y representa actualmente el 20% de la producción mundial [18].

El proceso en general tiene un rendimiento que se encuentra entre el 90 y 98%, cuando se hace referencia únicamente al material celulósico. Cuando se tiene en cuenta el agua en el producto final el rendimiento del proceso es de aproximadamente 255%. Comparándolo con los demás procesos de fabricación de pulpa este porcentaje es muy alto y eso se debe a que no se elimina la mayor cantidad de lignina (material no celulósico) lo cual disminuye la calidad del papel que se produce. A continuación se explican en detalle las etapas del proceso.

2.3.1 Selección: Una vez comprados los troncos de Pinus Elliotti se realiza la selección de aquellos que sean aptos para el proceso de pulpado, se descartan los que se encuentran torcidos, podridos, con huecos o con metales. Se considera un rendimiento aproximado del 95%. Este proceso es efectuado manualmente y como resultado se obtienen *troncos seleccionados*.

2.3.2 Descortezado: En esta etapa se procede a eliminar la corteza de los troncos ya que la misma posee poca fibra, presenta alto contenido de sustancias extractivas, es oscura y con frecuencia acarrea grandes cantidades de tierra. Este proceso es mecánico y se realiza mediante

una descortezadora de madera. El producto intermedio obtenido son los *troclos descortezados* y el rendimiento del proceso es del 98%, debido a la corteza retirada.

2.3.3 Cortado: se cortan en trozos los troncos libres de corteza, se lleva a cabo un corte tanto longitudinal como transversal. Esta etapa es necesaria para poder procesar los troncos en la siguiente etapa. Como rechazo se obtiene el aserrín lo que provoca que esta etapa tenga un rendimiento del 99%. La máquina a utilizar es una sierra de cinta para trocos y luego de este proceso se obtienen *troncos cortados*.

2.3.4 Desfibrado / Molienda: se muele la madera en trozos más pequeños, a su vez se le agrega agua y al mezclarse comienza a formarse la pasta. La máquina que se utiliza permite obtener una mezcla de agua y pulpa con una concentración entre el 2 y el 5%. Teniendo en cuenta una concentración media del 3,5%, el rendimiento de esta etapa es del 2857% respecto a la madera ingresada. Una vez finalizado este proceso, el producto intermedio que resulta es la *pulpa*.

2.3.5 Depuración / Tamizado: mediante un equipo de tamizado de pulpa gruesa se separan impurezas livianas, aire e impurezas pesadas, lo que provoca un rendimiento del 97% en esta etapa. El resultado de la etapa es la *pulpa tamizada*.

2.3.6 Refinado: la pulpa tamizada es sometida a un tratamiento mecánico para flexibilizar las fibras, esto permite que posteriormente la pulpa pueda ser utilizada para la producción de papel. Al no existir rechazos, el rendimiento es del 100%. Para llevar a cabo esta etapa se utilizan nueve refinadores de pulpa. La densidad de la misma debe ubicarse entre el 2 y 5% y el resultado de esta etapa se denomina *pulpa refinada*.

2.3.7 Filtrado: consiste en eliminar el exceso de agua obtenido en la etapa de desfibrado mediante una filtración por mallas metálicas finas. Se da por presión hidráulica y se elimina gran parte del agua que contiene la pulpa. La consistencia de entrada de la pulpa debe ser mayor al 3%, y la que se puede obtener de salida está entre el 25 y 45%. Considerando una media del 35%, el rendimiento de esta etapa es del 10%.

El producto obtenido es la pulpa filtrada, o celulosa mecánica, la cual se almacena en forma de fardos.

2.4 Método Kraft

En la actualidad el método Kraft es uno de los más utilizados, cubriendo alrededor del 72% de la producción mundial de celulosa [18]. El proceso que se lleva a cabo es químico y consiste básicamente en separar las fibras de celulosa mediante un proceso alcalino que genera la disolución de la lignina.

Si bien el rendimiento global del proceso es aproximadamente del 60%, una de las características más relevantes de esta alternativa es su capacidad de ser autosuficiente en cuanto a la provisión energética, ya que es posible suministrar parte o incluso la totalidad de las necesidades energéticas de la fábrica mediante la electricidad y vapor que resulta de la quema de componentes orgánicos de la madera disuelta. Además el proceso incluye la recuperación de uno de sus desperdicios convirtiéndolo nuevamente en un reactivo utilizable en la deslignificación (el licor blanco) [19].

La celulosa que se obtiene a partir de este método se utiliza en la fabricación de papel que requiere mejores características de calidad [20].

2.4.1 Selección, almacenamiento, descortezado y cortado: estas etapas del proceso son idénticas a las llevadas a cabo con el método mecánico (sección 2.1) y se utiliza la misma maquinaria.

2.4.2 Chipeado: La actividad consiste en llevar a dimensiones más pequeñas los troncos cortados que se ingresan, con este objetivo se obtienen astillas del tamaño adecuado que sugiere el digestor en la etapa que sigue. La máquina que se utiliza se denomina astilladora y el rendimiento del proceso es del 99%.

2.4.3 Clasificación de astillas o cribado: el tamaño del producto intermedio producido por las astilladoras tiene un amplio rango y la preparación de la pasta requiere que sean de dimensiones muy específicas para asegurar un flujo constante a través de los refinadores y un nivel de reacción uniforme en los digestores. En consecuencia, las astillas pasan por una serie de cribas cuyo fin consiste en clasificarlas por longitud y grosor, aquellas demasiado grandes se vuelven a pasar por la máquina, las menores se utilizan como residuos combustibles o se convierten en aserrín y sólo las del tamaño adecuado se usan en el paso que sigue.

La máquina de la cual se hace uso se denomina tamiz vibrante, donde el 90% de las astillas que se obtienen poseen un tamaño adecuado.

2.4.4 Cocción: Se lleva a cabo en un digestor de tipo continuo, las astillas o chips de madera se introducen por la parte superior y una vez que se encuentran dentro del digestor comienza la cocción entre éstas y el licor de impregnación (llamado licor blanco). Este último es una mezcla de hidróxido sódico (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S) que permite la liberación de las fibras de celulosa mediante la disolución de la lignina.

El desecho generado en el proceso se denomina licor negro, el cual es reprocesado para transformarse nuevamente en licor blanco.

El producto intermedio obtenido queda depositado en el fondo del digestor y se lo llama pulpa cruda. El rendimiento del proceso es del 62% de lo que ingresa al mismo.

2.4.5 Tamizado: La pulpa cruda se tamiza para separar los trozos de madera que hayan quedado sin digerir, los cuales se devuelven al digestor. El resultado de la etapa es la pasta cruda tamizada, la máquina utilizada se trata de un tamiz y el rendimiento es del 97%.

2.4.6 Lavado: La pasta de celulosa que sale del digestor es lavada y clasificada a través de varios filtros. Los nudos de la madera y otros chips que no pasan por los filtros son enviados de vuelta al digestor. La pasta filtrada y lavada por segunda vez constituye lo que se denomina celulosa sin blanquear. Esta pasta de celulosa tiene aún un contenido importante de lignina, que le da una tonalidad color café, similar al color natural de la madera. El rendimiento de esta etapa es 221,18% debido al ingreso de agua.

2.4.7 Blanqueo: Consiste en eliminar el remanente de lignina contenida en la pasta mediante la adición de productos químicos, tales como dióxido de cloro, oxígeno y soda cáustica. Existen dos procesos para llevar esto a cabo: ECF (libre de cloro elemental) y TCF (totalmente libre de cloro elemental). La diferencia radica en el agente oxidante utilizado. El primero utiliza dióxido de cloro y el segundo utiliza peróxido de hidrógeno y oxígeno. En el presente trabajo se utiliza la segunda opción.

Normalmente, en el proceso de blanqueo se pierde alrededor del 7% de la pasta color café, para alcanzar blancura estándar de 87-90%, según la norma ISO-2470.

En el proceso productivo se debe agregar un proceso de tratamiento de las aguas residuales con el fin de lograr los estándares de emisión exigidos por las normas ambientales (Ley general del ambiente: Ley Nacional 25.675) [21]. Por ello, luego del proceso de blanqueo las aguas son enviadas a plantas de tratamiento. Cabe aclarar que este aspecto no se tuvo en cuenta en el cálculo de costos que se efectúa en las secciones que siguen dado que no forma parte del proceso en sí y se propone como trabajo futuro.

2.4.8 Secado 1 y laminado: debido a que la pasta hasta este momento posee un gran contenido de agua, se utiliza una máquina llamada fourdrinier, la cual mediante el accionamiento de rodillos, extrae el agua de la pasta por gravedad y mediante bombas de vacío, dándole la forma de una lámina. El producto obtenido en esta etapa es la pulpa laminada. La consistencia de la pasta antes del secado es del 1 al 2% y luego del mismo pasa a ser del 46%.

2.4.9 Secado 2: consiste en dar un secado más intenso a la pasta laminada, en primer lugar utilizando pre-secadores, grandes cilindros en cuyo interior circula vapor a altas temperaturas. Luego pasa a los secadores principales, que por dentro están equipados de diversos rodillos calientes que conducen la lámina a través de calentadores por convección y radiadores infrarrojos. A la salida, la lámina secada posee una consistencia de 87 al 92%.

2.4.10 Embalado y almacenado: por último, utilizando una cortadora, las láminas toman una forma de pliegos que se apilan, éstos se presan y se embalan en una unidad denominada fardo, los cuales se almacenan en bodegas hasta el momento de su utilidad.

2.5 Ecuaciones de cálculo

2.5.1 Costos Totales: se trata de la totalidad de costos, tanto operativos como de estructura, necesarios para llevar a cabo la producción. Se componen de costos fijos (CF_m) y costos variables (CV_m). El conjunto "m" está compuesto por dos elementos, "m1" será el método mecánico y "m2" el Kraft.

$$CT_m = CF_m + CV_m \quad \forall m \quad (1)$$

2.5.2 Costos Fijos: son aquellos que no varían con el nivel de actividad que tenga la planta mientras los niveles de operación se mantengan dentro de los límites de la capacidad, es decir que su cuantía permanece constante en el período que se considere. Se compone por el costo de amortizaciones las maquinarias (C_m^{AM}) e inmueble (C_m^{AI}) de ambos procesos, por la parte fija de los servicios a contratar (agua, electricidad) (CS_m^{PF}) y por el costo que representan los salarios de los empleados. Estos últimos están conformados por los operarios, el personal jerarquizado y el administrativo (C_m^S).

$$CF_m = C_m^{AM} + C_m^{AI} + CS_m^{PF} + C_m^S \quad \forall m \quad (2)$$

• C_m^{AM} y C_m^{AI} : las máquinas (N) y los inmuebles pierden su valor o van desgastándose debido al mero paso del tiempo, por esta razón se amortizan según un período de tiempo. Las primeras en diez años y los segundos en cincuenta años. Para esto se definen los parámetros ($P_{10} = \frac{1}{120 \text{ meses}}$) y ($P_{50} = \frac{1}{600 \text{ meses}}$).

Se utilizará el subconjunto (N_m) para identificar a las máquinas pertenecientes a cada uno de los métodos. Además (C_n^{AM}) identifica los costos de adquisición de cada una de las máquinas e (I_m) el de cada uno de los inmuebles.

En el método mecánico, las máquinas que se emplean son una descortezadora (1), sierra de cinta para troncos (2), desfibradora (3), tamizadora (4), refinadora (5) y filtradora (6); y en el método Kraft se utilizan una descortezadora (7), sierra de cinta para troncos (8), astilladora (9), tamiz vibrante (10), digestor (11), filtros (12), máquina fourdriner (13), secadores (14) y cortadora de láminas (15).

$$C_m^{AM} = \sum_{n \in N_m} C_n^{AM} * P_{10} \quad \forall m \quad (3)$$

$$C_m^{AI} = I_m * P_{50} \quad \forall m \quad (4)$$

- CS_m^{PF} : Servicios parte fija: Consiste en un monto fijo que debe abonarse mensualmente por el simple hecho de adquirir el servicio, sin considerar el consumo. Los servicios (S_m) utilizados en ambos procesos son el agua (1) y la energía eléctrica (2).

$$CS_m^{PF} = \sum_{s \in S_m} CS_s \quad \forall m \quad (5)$$

- C_m^S : El costo de los salarios se integra por el correspondiente a los administrativos (C_m^{AD}), a los operarios de planta (C_m^{OP}), y al personal jerarquizado (C_m^{JE}). Para esto último se considera:

$$C_m^S = C_m^{AD} + C_m^{OP} + C_m^{JE} \quad \forall m \quad (6)$$

Se supone que en ambos procesos existe un número "a" correspondiente a administrativo, un número "o" para los operarios de producción y un número "j" correspondiente al personal jerarquizado. Por (R_a^{AD}), (R_o^{OP}), (R_j^{JE}) se entiende al monto de remuneración mensual asignado a los trabajadores de cada una de las categorías respectivamente.

$$C_m^{AD} = \sum_{a \in A_m} R_a^{AD} \quad \forall m \quad (7)$$

$$C_m^{OP} = \sum_{o \in O_m} R_o^{OP} \quad \forall m \quad (8)$$

$$C_m^{JE} = \sum_{j \in J_m} R_j^{JE} \quad \forall m \quad (9)$$

2.5.3 Costos Variables: representan los costos que varían según el nivel de actividad de la producción. Involucran costos de procesamiento tales como la parte de los servicios que dependen del consumo (CS_m^{PV}), materias primas (C_m^{MP}) e insumos (C_m^I).

$$CV_m = CS_m^{PV} + C_m^{MP} + C_m^I \quad \forall m \quad (10)$$

- CS_m^{PV} : Servicios parte variable: Es lo que se abona mensualmente debido al consumo de cada unidad de servicio (S_m). Dependiendo del mismo existe un costo por unidad (CSu_s), que multiplicado por lo consumido (G_s), resulta el costo mensual.

$$CS_m^{PV} = \sum_{s \in S_m} CSu_s * G_s \quad \forall m \quad (11)$$

- C_m^{MP} : El costo de la materia prima en ambos procesos está integrado por los principales componentes del producto. En ambos métodos la materia prima son los troncos de Pinus Elliotti. Se calcula como el costo unitario de estos (C_m^{MPu}) por lo consumido (U_m).

$$C_m^{MP} = C_m^{MPu} * U_m \quad \forall m \quad (12)$$

- C_m^I : Costo de insumos: Representa lo sacrificado en conceptos de los insumos ingresados en las etapas de los procesos. Para el caso de estudio solo existen en el método Kraft. Se calcula como el costo unitario (C_m^{Iu}) por lo consumido (V_m).

$$C_m^I = C_m^{Iu} * V_m \quad \forall m \quad (13)$$

3- RESULTADOS

A continuación se plantean casos de estudio para ambos métodos, con el objetivo de poner en práctica las ecuaciones propuestas para el cálculo de costos.

3.1 Método Mecánico

Por turno, la empresa cuenta con 12 operarios distribuidos de manera tal que se cumpla con lo que se estima producir en el mes. Estos están coordinados por un Jefe de Producción. Por otro lado se cuenta con dos empleados encargados de la parte administrativa y un Jefe de Administración. Se trabaja con dos turnos de 8 horas cada uno, considerando 24 días al mes, es decir, de lunes a sábados.

La producción mensual viene dada por la capacidad de la máquina que menos produce por hora, en este caso es la filtradora, que puede filtrar hasta 0,93 toneladas de Pinus Ellioti por hora. Teniendo en cuenta esto y las horas trabajadas, la capacidad mensual de la planta se estima en 911,87 toneladas de celulosa al mes.

Para determinar el costo unitario de la tonelada de celulosa se utiliza el modelo de costeo completo normalizado por absorción. Esto quiere decir que se costeará lo que se estima producir y que los costos fijos serán distribuidos por igual entre el total de toneladas a producir.

En las tablas 1, 2 y 3 se detallan los resultados obtenidos:

Tabla 1: Composición de los costos fijos

COSTOS VARIABLES		
Materia prima	\$ 65.041,83	\$/mes
Servicios	\$ 185.915,51	\$/mes
Total	\$ 250.957,34	\$/mes

Tabla 2: Composición de los costos fijos

COSTOS FIJOS		
Amortizaciones	\$ 39.322,92	\$/mes
Servicios	\$ 130,45	\$/mes
Salarios	\$ 432.100,00	\$/mes
Total	\$ 471.553,37	\$/mes

Tabla 3: Composición de costos totales

COSTOS TOTALES	
Costos fijos	\$ 471.553,37 \$/mes
Costos Variables	\$ 250.957,34 \$/mes
Costos Totales	\$ 722.510,71 \$/mes

En las figuras 2, 3 y 4 se muestran la desagregación y porcentaje de los costos mencionados.

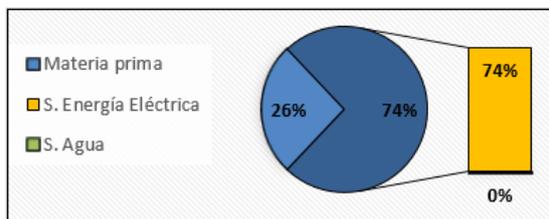


Figura 2: Desagregación de costos variables

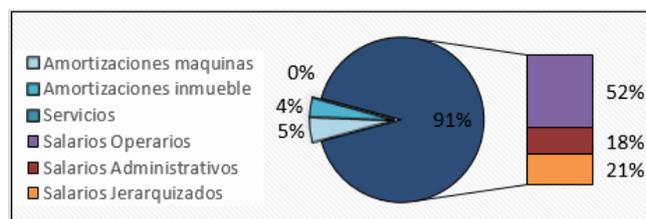


Figura 3: Desagregación de costos fijos

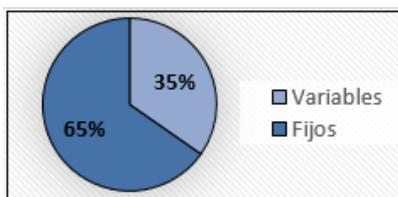


Figura 4: Desagregación de costos totales

3.2 Método Kraft

Las condiciones de jornada laboral y la cantidad de empleados administrativos se mantienen como lo planteado en el punto 3.1. Sin embargo, en este caso la mano de obra productiva alcanza un total de 18 personas, debido a las exigencias de este proceso. Para esta alternativa la máquina más restrictiva en la capacidad es la astilladora que puede procesar 1,36 toneladas de materia prima por hora. Por lo tanto, la capacidad mensual de la planta se estima en 338,87 toneladas de celulosa. Al igual que en método mecánico, se aplica el modelo de costeo completo por absorción normalizado. En las tablas 4, 5 y 6 se observan los resultados obtenidos:

Tabla 4: Composición de costos fijos

Tabla 5: Composición de costos fijos

COSTOS VARIABLES			COSTOS FIJOS		
Materia prima	\$ 94.881,36	\$/mes	Amortizaciones	\$ 34.254,17	\$/mes
Insumos	\$ 1.738.788,53	\$/mes	Servicios	\$ 130,45	\$/mes
Servicios	\$ 38.191,14	\$/mes	Salarios	\$ 553.900,00	\$/mes
TOTAL	\$ 1.871.861,03	\$/mes	TOTAL	\$ 588.284,62	\$/mes

Tabla 6: Composición de costos totales

COSTOS TOTALES	
Variables	\$ 1.871.861,03 \$/mes
Fijos	\$ 588.284,62 \$/mes
TOTAL	\$ 2.460.145,65 \$/mes

A continuación, en las Figuras 5, 6 y 7 se muestran la desagregación de los costos fijos, variables y totales, respectivamente.

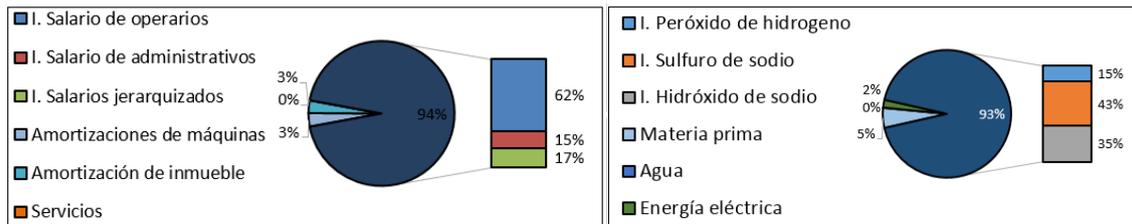


Figura 5: Desagregación de costos fijos

Figura 6: Desagregación de costos variable

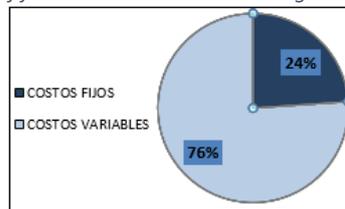


Figura 7: Desagregación de costos totales

3.3 Resultados de ambos procesos.

Teniendo en cuenta el rendimiento global del proceso mecánico (255%), la cantidad producida en el mes y los costos detallados en la Tabla 3 se concluye que una tonelada de celulosa obtenida mediante el método mecánico tiene un costo de \$792,34. Si se cambia la unidad de análisis a toneladas de Pinus Ellioti, el costo unitario es de \$2.023,84. Esto se obtiene de utilizar el rendimiento como factor multiplicador. Por otro lado, para producir una tonelada de pulpa Kraft al nivel de máxima capacidad, los costos de procesamiento son de \$2.460.145,65 por mes y el de una tonelada de celulosa \$7.259,86, donde el 24% corresponde a costos fijos y 76% a costos variables. Además puede verse que de los costos fijos el más representativo en su volumen es el salario de los operarios de producción y con respecto a los variables, el valor que se destaca son los insumos utilizados en el proceso, es decir los productos químicos utilizados esenciales para la cocción de la pulpa (hidróxido de sodio y sulfuro de sodio).

Con el objetivo de poder realizar el análisis de beneficios y rentabilidades, es que se otorgaron precios de venta a cada tipo de tonelada de celulosa. Los mismos fueron tomados de los precios de venta medios internacionales. En caso de la tonelada mecánica el precio es aproximadamente \$1.500 (U\$S 100) mientras que el de la pulpa Kraft es de \$12.900 (U\$S 840).

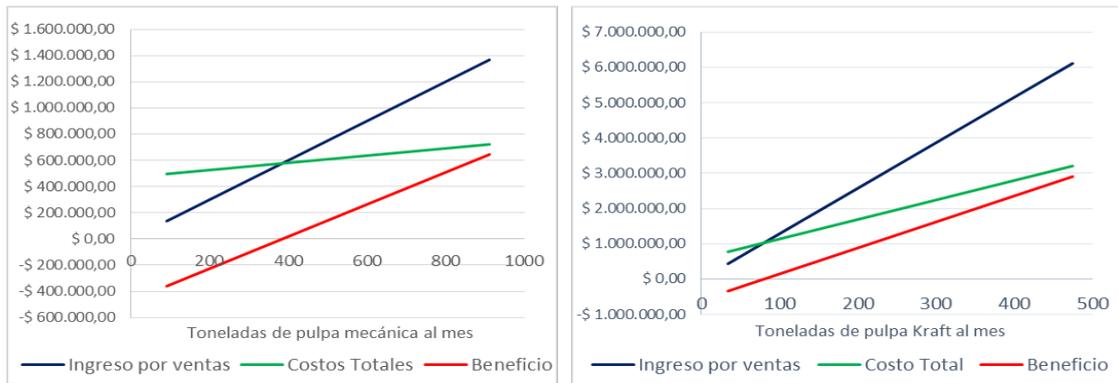


Figura 8: Variación de ingresos, costos y beneficio para pulpa mecánica y Kraft respectivamente

Las gráficas que se muestran en la Figura 8, hacen mención a los costos totales de los procesos mecánico y Kraft respectivamente. Como es de esperar, a medida que aumenta la cantidad a producir, aumentan los costos totales de producción y también, en mayor medida los ingresos que se obtienen. También, se incluye en las gráficas el beneficio absoluto que se alcanza a medida que varía el nivel de producción, la cual también, una vez alcanzado el punto de equilibrio (dónde los ingresos son iguales a los costos) muestra las ganancias que se tienen con cantidades de celulosa cada vez mayores. En el caso de la celulosa mecánica éste punto se da a las 385 toneladas de celulosa mensuales, mientras que para la celulosa Kraft se deben alcanzar en el mismo período las 79,82 toneladas.

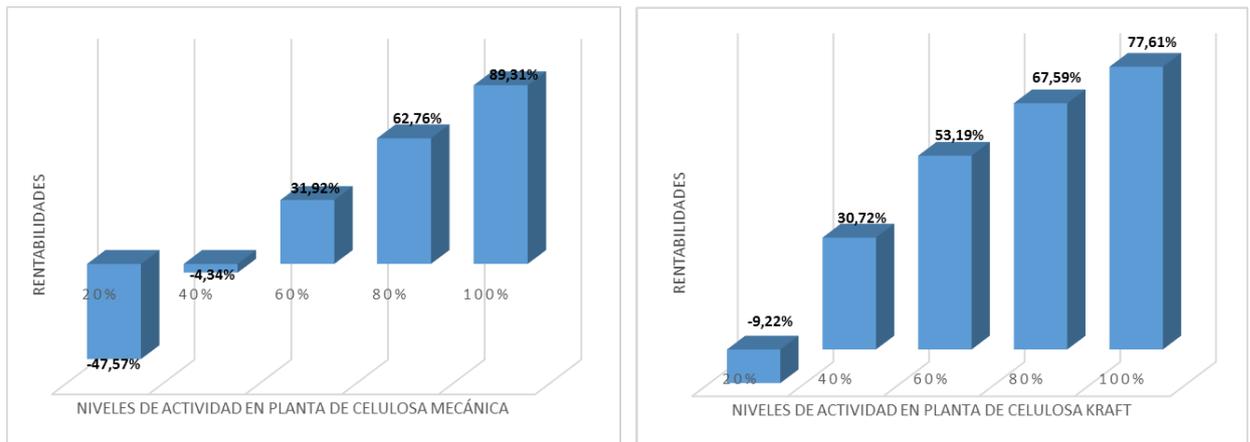


Figura 9: Rentabilidades para diferentes niveles de actividad en celulosa mecánica y Kraft respectivamente

En las imágenes mostradas en la Figura 9 puede verse una comparación de la rentabilidad que se obtiene con diferentes niveles de actividad para cada alternativa, el valor de mayor rentabilidad corresponde al nivel de producción actual de ambas plantas, el cual corresponde a la capacidad instalada. Como se observa, a medida que aumenta la cantidad de celulosa que se obtiene, se produce un aumento gradual de la rentabilidad.

A continuación, se visualizan las imágenes de la gráfica de rentabilidad de cada proceso, así como también la fórmula de cálculo.

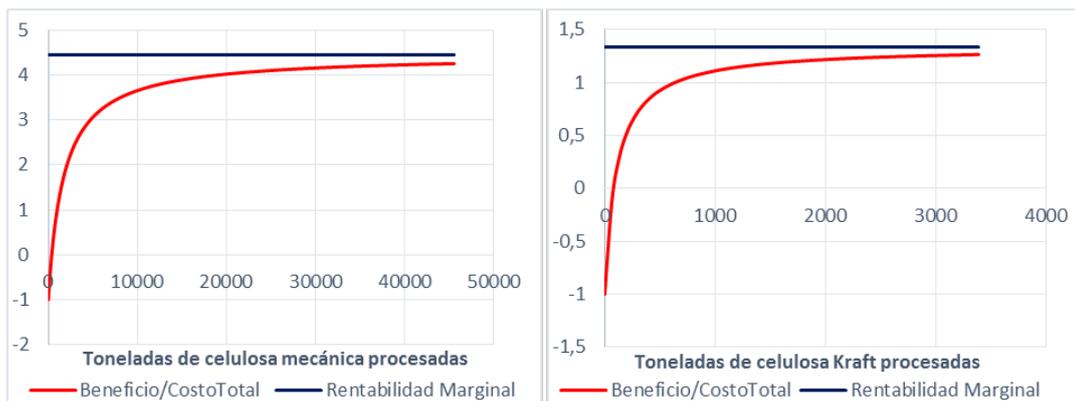


Figura 10: Rentabilidad para distintas cantidades de celulosa mecánica y Kraft procesadas respectivamente

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costos Totales}} = \frac{(\text{Precio de Venta} - \text{Costo Variable unitario}) * \text{Cantidad a producir} - \text{Costos Fijos}}{(\text{Costos Fijos} + \text{Costos Variables})} \quad (14)$$

Como se observa, la misma tiende a un valor asintótico que es el máximo valor que podría obtenerse en las condiciones dadas y corresponde a la rentabilidad marginal (contribución marginal unitaria sobre costo variable unitario), es decir que llegado a ese valor, independientemente de la producción que se lleve a cabo, la rentabilidad no sufrirá modificaciones importantes. Lo contrario sucede al principio de la gráfica, donde incluso pequeños aumentos en el nivel de producción se refleja en grandes incrementos de la rentabilidad.

Analizando los beneficios relativos obtenidos para este caso de estudio ($b_{\text{mecánico}}=0,89$ y $b_{\text{kraft}}=0,78$) y comparándolos con las rentabilidades marginales ($r_m= 4,45$ para el mecánico y $r_m= 1,33$ para kraft), se puede notar que en ambos procesos se está trabajando lejos del máximo valor de rentabilidad posible de obtener. No obstante, comparando estos índices entre ambos procesos, se puede afirmar que en el caso del mecánico existe un mayor potencial de mejora que en el Kraft.

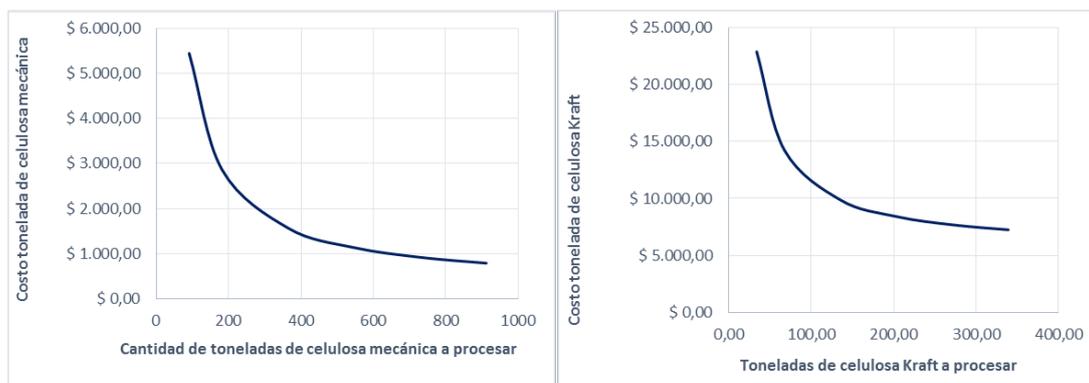


Figura 11: Variación del costo unitario de la celulosa mecánica y Kraft, respectivamente al aumentar el nivel de producción

Las imágenes de la Figura 11 hacen referencia a cómo disminuye el valor del costo unitario de una tonelada de celulosa al aumentar la cantidad que se produce de la misma. Esto se debe a las particularidades del modelo de costos que se utiliza, ya que al aumentar la cantidad de celulosa, los costos fijos se deberán dividir entre un valor cada vez mayor y por lo tanto, el resultado de dicho cociente será cada vez menor.

4. Conclusión

Se pudo estudiar y detallar de manera precisa los métodos Mecánicos y Kraft para la elaboración de pasta celulósica. A partir de esto se formularon ecuaciones generalizadas correspondientes para el cálculo de costos de ambos procesos. Utilizando el modelo de costeo completo normalizado por absorción se obtuvieron datos de costos unitarios y así se generó información certera cumpliendo con el objetivo planteado para este trabajo. Por otro lado, el análisis gráfico que se lleva a cabo en la sección 3 permite comprender y analizar en detalle los beneficios y rentabilidades y de esta manera tomar decisiones que de aquí se desprenden.

5. Referencias

- [1] Teschke, Kay. "Industria del papel y de la pasta de papel". *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*. 72. 2-12.
Web: <http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Enciclopedia OIT/tomo3/72.pdf>
- [2] Cerutti, Julia. (2013). Análisis de diagnóstico tecnológico sectorial. Celulosa y papel.
Web: <http://www.mincyt.gob.ar/adjuntos/archivos/000/043/0000043767.pdf>
- [3] Nuñez, Carlos E. (2008). Introducción a la industria de la pulpa y el papel.
Web: www.cenunez.com.ar
- [4] Soporte técnico de los papeles para SCA Publication Papers (2010).
Web: http://www.sca.com/Global/Publicationpapers/pdf/Brochures/Papermaking_ES.pdf
- [5] Raffaelli, Natalia; Tonello, Ma. Laura. (2015). Pulpa y papel. Industrias de transformación química.
Web: <http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/course/view.php?id=109>
- [6] Boeykens, Susana. (2006). "Procesos para la producción de papel y pulpa: De la naturaleza a la mesa". *Encrucijadas*, 38. Buenos Aires, Argentina.
Web: <http://repositorioubasibsi.uba.ar>

- [7] Bajpai, Pratima. (2012). *Biotechnology for Pulp and Paper Processing*. Patiala, India. Springer Science+Business Media. Nueva York, Estado Unidos.
- [8] Lopez Sardi, Estela M.; García, Beatriz; Peralta, Antonela. (2010). "Biopulping: aplicación de biotecnología en la industria del papel". *Ciencia y Tecnología*, 10, 65-79.
Web: http://www.palermo.edu/ingenieria/pdf2012/cyt/numero10/10N_ISEU_CyT05.pdf
- [9] Estructplan on-line. Impactos Ambientales y Actividades Productivas. Celulosa y Papel. (2016).
Web: <https://www.estrucplan.com.ar/Producciones/imprimir.asp?IdEntrega=225>
- [10] Coronel de Renolfi, Marta. (2007). "Costos Forestales". Facultad de Ciencias Forestales- Universidad Nacional de Santiago del Estero, *Serie Didáctica*, 30, 1-90. Santiago del Estero, Argentina.
Web: <http://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-30-Costos-forestales-RENOLFI.pdf>
- [11] Chaik, Hugo. (2008). Proyecto: Producción de Pulpa de Madera BCTMP. Maestría en Evaluación de Proyectos. ITBA. Universidad del Cema.
Web: https://www.ucema.edu.ar/posgradodownload/tesinas2010/Tesina_MEP_UCEMA_Ch aik.pdf
- [12] Buyukkamaci, Nurdan; Koken, Emre. (2010). "Economic evaluation of alternative wastewater treatment plant options for pulp and paper industry". *Science of The Total Environment, Elsevier*, 408,24,6070–6078.
Web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.08.045>
- [13] Holmberg, Henrik; Isaksson, Johan; Lahdelma, Risto. (2014). "Minimization of total drying costs for a continuous packed-bed biomass dryer operating at an integrated chemical pulp and paper mill". *Biomass and Bioenergy, Elsevier*, 71, 431–442.
Web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.09.010>
- [14] Xu, Tengfang; Sathaye, Jayant; Kramer, Klaas. (2013). "Sustainability options in pulp and paper making: Costs of conserved energy and carbon reduction in the US". *Sustainable Cities and Society, Elsevier*, 8, 56–62.
Web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.006>
- [15] Manzardo, Alessandro; Jingzheng, Ren; Piantella, Antonio; Mazzi, Anna; Fedele, Andrea; Scipioni, Antonio. (2014). "Integration of water footprint accounting and costs for optimal chemical pulp supply mix in paper industry". *Journal of Cleaner Production, Elsevier*, 72, 167–173.
Web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.014>
- [16] Machani, Mahdi; Noureifath, Mustapha; D'Amours, Sophie. (2014). "A mathematically-based framework for evaluating the technical and economic potential of integrating bioenergy production within pulp and paper mills", *Biomass and Bioenergy, Elsevier*, 63, 126–139.
Web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.02.024>
Web: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.014>
- [17] Garcia, Laura; Podmoguilnye, Marcelo (2004). La necesidad cualitativa de los factores y la consideración del Modelo de Costeo Directo. XXVII Congreso Argentino de Profesores Universitarios de Costos. Tandil, Buenos Aires, 34.
- [18] Bajpai, P. (2015). Pulp and Paper Industry. Patiala, Punjab, India. Elsevier.
- [19] Colodette, J., Gomez C., Rabelo M, Eiras K. Avances en el blanqueo de pulpa Kraft de eucalipto. Congreso: II Coloquio de Eucalipto. Chile
- [20] Stellman, J. Mager. (2008). Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. Chile, Santiago de Chile. Gestión editorial Chantal Dufresne BA.
- [21] Ley general del ambiente: Ley Nacional 25.675. (2002). Web: http://www.icaa.gov.ar/Documentos/Ges_Ambiental/LEY-25675-GENERAL-AMBIENTE.pdf

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer la dirección de la Dra. M. Analía Rodríguez y la codirección del Ing. Víctor Tucci.

De igual manera, se agradece a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe por el apoyo y financiamiento brindado durante el desarrollo del presente trabajo.