



MÁSTER DE ESTADÍSTICA APLICADA
PARA LA CIENCIA DE DATOS CON R SOFTWARE

Análisis Clúster de calidades de papelotes
para su clasificación según su funcionalidad

AUTOR: Xavier Roigé Torrell

DIRECTOR: Juan Luís López

FECHA: 30 – 01 - 2024

ENTIDAD COLABORADORA:



RESUMEN

En el presente estudio se ha realizado una clasificación de las distintas materias primas (papel reciclado) utilizadas en la fabricación de papel. La clasificación se ha realizado en tres grupos en función de las propiedades que otorgan las fibras que forman parte de estas materias primas al papel fabricado (estructural, relleno o resistencia).

La clasificación de las distintas materias primas dentro de uno de los tres grupos se ha realizado en función de la morfología de sus fibras, analizadas con un equipo de laboratorio.

Mediante el estudio estadístico se ha determinado que propiedades morfológicas de las fibras definen a cada grupo y que calidades forma cada grupo.

Se concluye que las materias primas se pueden dividir en tres grandes grupos diferenciados y algunos subgrupos. Cada grupo está claramente definido por propiedades de la fibra distintas, de forma que se pueden describir con claridad. La clasificación resultante es distinta a la existente hasta el momento la cual no consideraba la morfología de las fibras.

Los resultados obtenidos ayudan a definir cada calidad en función de la morfología de sus fibras, mostrando que propiedades son más relevantes para cada una de las ellas.

ABSTRACT

In this study, a classification of the different raw materials (recycled paper) used in paper manufacturing has been carried out. The classification has been made into three groups based on the properties that the fibers that are part of these raw materials give to the manufactured paper (structural, filling or resistance).

The classification of the different raw materials within one of the three groups has been carried out based on the morphology of their fibers, analyzed with laboratory equipment.

Through the statistical study, it has been determined which morphological properties of the fibers define each group and what qualities each group forms.

It is concluded that raw materials can be divided into three large differentiated groups and some subgroups. Each group is clearly defined by different fiber properties, so they can be clearly described. The resulting classification is different from the one that existed until now, which did not consider the morphology of the fibers.

The results obtained help to define each quality based on the morphology of its fibers, showing which properties are most relevant for each of them.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a Alier y en especial a su Dirección la oportunidad que se me ha brindado para la realización de este máster universitario. Ha sido una gran oportunidad para mí, tanto a nivel profesional como a nivel personal. He podido crecer como persona y he podido ampliar mis conocimientos sobre el mundo del papel gracias al estudio estadístico de sus propiedades. Pero más importante para mí ha sido la confianza que Alier ha mostrado ofreciéndome esta gran oportunidad.

Aprovecho para agradecer a mi familia, en especial a mi mujer y a mi hija, todo su apoyo, así como su ayuda y comprensión durante las largas horas dedicadas al estudio.

También agradezco a todo el equipo de Máxima Formación, en especial a todo el grupo docente, todos los conocimientos impartidos, tanto los que forman parte del plan de estudio del máster como el resto de los conocimientos facilitados.

Finalmente, pero no menos importantes, mi compañera de trabajo, Mariana Ferra, por su gran trabajo realizado en sus estudios del Máster del Master Universitario en Tecnología Papelera y Grafica, el cual me ha sido de gran utilidad en el momento de la obtención de datos para este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	1
ABSTRACT	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE DE CONTENIDOS	3
INTRODUCCIÓN:	4
Justificación	4
Objetivo.....	6
MATERIAL & MÉTODOS	7
Calidades.....	7
Propiedades analizadas	10
Grupos funcionales	14
RESULTADOS:	15
DISCUSIÓN:	22
Grupos funcionales	22
Principales componentes.....	23
Justificación	23
Agrupaciones	23
Calidad y Contribución	24
Clasificación.....	25
CONCLUSIONES	26
REFERENCIAS/BIBLIOGRAFÍA	27
ANEXOS	28
ANEXO A. Datos iniciales para el estudio.....	1

INTRODUCCIÓN:

Justificación

En la producción de papel existen dos tipos distintos de fábricas en función del origen de las fibras utilizadas como materias primas, estas se distinguen entre fábricas que utilizan fibras vírgenes proveniente de orígenes vegetales, principalmente árboles (tanto de la familia de las coníferas como de la familia de las frondosas) y fábricas que utilizan papelote (papel reciclado) como origen de las fibras utilizadas en su producción.

En el caso de las fábricas que utilizan papel reciclado como materia prima para la obtención de las fibras necesarias, el origen de este puede ser muy variado y las clasificaciones que se pueden realizar son muchas. Se puede clasificar la materia prima en función de su uso anterior pudiendo ser preconsumo (papel que ha sido fabricado, pero no utilizado, por ejemplo, restos de producciones defectuosas) o postconsumo (papel que ya se ha utilizado). También se puede clasificar en función de su contenido en papel o cartón (mezclas de papel de oficina o revistas mezcladas con cajas u otros tipos de cartones), la cantidad de impurezas que contiene (contenido de los contenedores de recogidas selectivas), el acabado que se le dio en su primera fabricación (aplicación de estucado o una lámina de plástico para otorgar propiedades ópticas o hidrofóbicas), la cantidad de tinta que contiene, el proceso de obtención de las fibras (pasta química o mecánica), tipo de árbol del que se han obtenido las fibras (conífera o frondosa), etc. Es decir, las clasificaciones que se pueden realizar de formas distintas, en función de varias características que definen los papelotes. Dentro de estas posibles clasificaciones, cada fabricante de papel utiliza la que mejor se adapta a sus necesidades.

Para intentar normalizar esta situación o clasificación, existe una Norma europea (UNE-EN 643) que clasifica los distintos tipos o calidades de papelote en función de estas y otras propiedades. Pero en ningún caso, esta clasificación tiene en cuenta la morfología de la fibra. Se puede dar el caso de que, por definición, una de las calidades pueda estar formada por tipos muy distintos de fibras y, por lo tanto, que la misma calidad se comporte de forma distinta en función de la muestra consumida. Es por esta razón que se considera tan importante el análisis de las fibras que forman los papelotes, ya que con los resultados de los análisis se puede determinar de forma muy eficaz el comportamiento que tendrá el papel producido con dichas fibras. Finalmente, cada fábrica de papel puede crear sus propias calidades en función de la materia prima que adquiere o en función de sus necesidades.

En función de la utilidad que se le requiere al papel final, la materia prima a utilizar será de una calidad determinada o una mezcla específica de cada una de las calidades existentes, ya que cada calidad de materia prima puede otorgar unas ciertas propiedades al papel fabricado. Para determinar la materia prima a utilizar o la mezcla/receta de las distintas calidades, se ha creado una división de las distintas materias primas en base a su función dentro de la fabricación del papel final siendo estas la Estructuras, la de Relleno y la de Resistencia. Como sus nombres indican, estas materias primas son utilizadas para otorgar ciertas propiedades al papel (estructurales o de resistencia) o simplemente para aumentar el contenido en fibra (relleno). Esta clasificación depende en gran parte del uso que se le pretenda dar al papel producido, un cierto papelote puede ser de relleno para un papel con un uso final determinado siendo de resistencia para otro tipo de papel a producir.

Esta última clasificación se ha ido realizando a lo largo del tiempo en base a la experiencia de los fabricantes y de las necesidades del papel producido por cada uno de los fabricantes. Cada uno de los consumidores de estas materias primas clasifica las distintas calidades dentro de uno de estos tres grupos funcionales según sus necesidades y experiencias.

Las propiedades que puede otorgar cada papelote a un papel producido están determinadas en última instancia por las fibras que lo componen. Es la morfología de las fibras (tamaño, resistencia, etc.) la que determina que propiedades tendrá el papel que se produzca con ellas.

Con la aparición de nuevas tecnologías, actualmente es posible realizar un análisis de las fibras para determinar su morfología, obteniendo valores de su longitud, anchura, macrofibrilación,

cantidad de finos presentes en la pulpa, etc. Estas técnicas son relativamente nuevas ya que precisan de un potente software informático para su análisis.

Independientemente de las propiedades que definen los papelotes según la Norma UNE-EN 643, el estudio de la morfología de la fibra de cada una de las materias primas utilizadas puede dar una mejor clasificación de esta teniendo en cuenta que su comportamiento (o función) depende de su morfología.

El hecho de poder clasificar las distintas calidades de papelotes según su función en base a la morfología de sus fibras implicaría un mejor aprovechamiento de estas. Las mezclas se podrían realizar de forma más precisa teniendo en cuenta que la morfología de las fibras es la que determinará el comportamiento de estas y, por lo tanto, su clasificación.

Una mejor clasificación de las calidades de los papelotes implicaría un posible ahorro de materia prima al poder utilizar la que mejor se adapte a su uso final teniendo en cuenta la morfología de las fibras y no su clasificación según la Norma UNE.

Por otro lado, el conocimiento de esta clasificación puede ayudar a encontrar sustitutos de una materia prima determinada, ya que con una buena clasificación se puede determinar si existe otra materia prima similar o que ofrezca propiedades similares que puedan servir de igual forma a la producción del papel final.

El hecho de que los análisis de la morfología de la fibra son relativamente recientes y que cada fabricante de papel dispone o necesita de sus propias clasificaciones y que todos los fabricantes clasifican (sin problemas aparentes) según su propia experiencia favorece que hasta el momento este tipo de análisis no sean habituales. No se conocen casos o investigaciones referentes a este tipo de estudios, se puede considerar que este es el primer estudio de este tipo, con lo cual, los resultados no solo podrían arrojar información que se desconoce hasta el momento, también podría cambiar la actual clasificación de los papelotes en base a su función y abrir nuevas líneas de investigación mediante nuevos proyectos o estudios.

Es importante tener en cuenta que la morfología de las fibras incluye un gran número de propiedades y que estas se pueden relacionar a la vez con un gran número de calidades de papelotes o de propiedades finales del papel. No es fácil, con métodos tradicionales, poder encontrar una relación entre todas las variables, por eso se considera necesario el uso de métodos estadísticos para poder encontrar estas relaciones y en especial, el uso de programas informáticos con gran capacidad de cálculo. Por lo tanto, para poder realizar este estudio es tan importante el hecho de disponer de equipos de análisis de la morfología de la fibra como la disposición de equipos y programas informáticos que permitan la realización de gran cantidad de cálculos.

Por lo tanto, este estudio no solo puede ser de gran utilidad en la industria papelera en cuanto a la clasificación de la materia prima utilizada con el consiguiente ahorro económico que esto generaría, así como la mejora de la calidad del papel debido a una buena elección de la materia prima también puede ser de gran utilidad al aportar nueva información o nuevos métodos de investigación sobre este tema, poco analizado hasta el momento.

Este estudio también podría ser el precedente de muchos otros estudios que puedan relacionar la morfología de la fibra con las propiedades del papel.

Se considera que el uso de la estadística para este tipo de análisis o estudios puede ser vista como una herramienta necesaria para ello después de los resultados mostrados en estos estudios.

En resumen, los resultados de este estudio pueden arrojar mucha información importante en el sector papelero debido a la importancia de los resultados que se pueden obtener y por el hecho que no existen estudios similares que aporten este tipo de información. También es de gran importancia el hecho de la realización de estudios con este tipo de métodos estadísticos mediante software informático.

Objetivo

Como se ha comentado en el apartado anterior, no existen estudios específicos sobre este tema en particular.

La clasificación actual de las materias primas teniendo en cuenta su función se realiza en base a la experiencia de los productores de papel, sin tener en cuenta las propiedades de las fibras. Estas clasificaciones se realizan sin tener en cuenta el criterio técnico ni la importancia de la morfología de las fibras.

En cuanto al estudio de las fibras vegetales que componen del papel y de las distintas calidades de papelotes, existe algún estudio. Concretamente, se parte de un Trabajo de Final de Máster del Máster Universitario en Tecnología Papelera y Grafica en el que analizó la morfología de las distintas calidades de papel utilizado en una industria de papel (Alier, S.A.).

En el citado estudio, se clasificaron las distintas calidades de papelote en base a su función, teniendo en cuenta la clasificación de la empresa, en realizada según su experiencia. No era el objetivo de dicho estudio la clasificación que se pretende realizar en el presente estudio.

Como datos iniciales se tomarán los obtenidos en el TFM mencionado, partiendo de los valores de morfología de la fibra de cada una de las calidades analizadas. Se supondrá que los valores son correctos y representativos para cada una de las calidades.

Por otro lado, no todas las propiedades obtenidas en el estudio (datos de partida para este estudio) serán necesarias para el análisis ya que se conoce que alguna de las propiedades es función de otras y que algunas de las propiedades son complementarias entre ellas.

En primer lugar, se realizará un análisis Cluster de los datos para poder analizar si existen relaciones entre ellos, si se pueden dividir en grupos debido a la morfología de la fibra.

Mediante este análisis se reclasificarán, si es necesario, las distintas calidades entre los grupos funcionales existentes.

Finalmente se analizará que propiedades son la más influyentes y en que magnitud, en el momento de definir a que grupo funcional pertenecen. Estos datos se obtendrán mediante un análisis PCA.

Por lo tanto, se considera que son dos los objetivos principales de este estudio, por un lado, la clasificación en tres grupos funcionales, en base a la morfología de las fibras que componen cada una de las distintas calidades de materias primas formadas por papeles reciclados.

Y como objetivo secundario, la posible agrupación de varias de las materias primas en subgrupos para poder cuales de ellas podrían llegar a ser sustitutas una de otras.

MATERIAL & MÉTODOS.

Este trabajo corresponde a un estudio de caso basado en datos reales de la morfología de las fibras de varias calidades de papelotes, obtenidos de otro TFM, que a la vez fueron obtenidos mediante ensayos reales en un laboratorio de una fábrica de papel.

La materia prima utilizada para el análisis fue extraída de la campa de materia prima de una empresa dedicada a la producción de papel utilizando papel reciclado como única materia prima. Es decir, los valores obtenidos en dichos análisis correspondían a datos reales. Los ensayos de realizaron en el laboratorio de dicha empresa con un equipo real.

Para obtener la pulpa necesaria para su análisis, se utilizó un desintegrador de laboratorio con el que se pulpearon varias muestras de cada una de las calidades de papelote. Mediante este procedimiento de pulpeado, se desintegraron las fibras para poder permitir su análisis en el equipo destinado a tal efecto.

Para obtener los valores de morfología de la fibra se utilizó un equipo MorfiNeo de la casa comercial TechPap.

Por lo tanto, los datos que se utilizan para el presente estudio provienen de otro estudio realizado anteriormente, pero corresponden a datos reales obtenidos de ensayos de laboratorio de papeles de las distintas calidades que se utilizan actualmente en la fábrica de papel donde se realizó el estudio.

Calidades

El departamento de materia prima de Alier, mediante su experiencia adquirida con los más de 80 años de utilización de papeles reciclados, creó un catálogo de calidad para poder utilizar en la creación de las recetas. La clasificación se realiza en grupos de papeles los cuáles son:

- Blancos.
- Cartón
- Kraft.

Esta clasificación a su vez agrupa las diferentes calidades de materias primas, y su descripción según la norma UNE, aquellas que están contempladas dentro de ella y las que no, con una descripción interna. La norma española UNE que trata sobre papel y cartón: "Lista europea de calidades estándar de papel y cartón recuperado" es la norma UNE-EN 643.

En este proyecto se tratarán los grupos de calidades llamados Cartón y Kraft. Las calidades de Blancos se diferencian entre ellas por la blancura (o cantidades de tintas) que lleva el papel, pero no en cuanto a sus propiedades otorgadas por las fibras. Debido al uso que se les da a las fibras procedentes de los papeles Blancas dentro de esta empresa, no se considera necesario la inclusión de estos papeles en el presente estudio. Todos los papeles blancos son utilizados con el mismo fin y únicamente se realizan subclasificaciones para determinar cuan blancos son. Por razones técnicas de la propia producción el papel (cantidad de este papel utilizado, porcentaje de su utilización dentro de la hoja final del papel, etc.) no se considera de utilizad la inclusión de estas calidades de papelotes en este estudio. La inclusión de estos papelotes incrementaría la dificultad para la obtención de resultados y no aportaría información relevante en cuanto a la utilización de estas calidades.

Como se ha dicho anteriormente, la clasificación que se busca corresponde a 3 grandes grupos funcionales. Los papelotes blancos se utilizan en su totalidad para la misma función, por lo tanto, no tiene sentido intentar agruparlos en uno de los tres grupos propuestos.

Por otro lado, los papelotes blancos no se mezclan con los de las calidades Cartón ni Kraft, razón por la que no se incluirán en el presente estudio.

En las tablas número 2 y 3, se plasma una breve descripción de las calidades de materia prima a estudiar en este estudio. En las imágenes 4, 5, 6 y 7 se pueden observar dichas calidades en la campa de materia prima de Alier. Como se puede observar en las tablas, las distintas calidades se clasifican en función del contenido de diversas materias, no en función de la morfología de la fibra, que es la que ofrece las distintas propiedades al papel.

Tabla 1: Descripción de calidades "Cartón".

Cartones		
Calidad	Descripción	Código EN 643
PMA	Mezcla de papel y cartón 60%-40%	1.02.00
PAL	Papel y cartón ondulado 70%-30% (sin tapas ni otros impropios que no sean papel y cartón)	1.04.01
SKN	Cartón ordinario ondulado 90%-10%.	1.05.00
TPK	Cartón de envases para bebidas	5.03.00

Tabla 2: Descripción de calidades "Kraft".

Kraft		
Calidad	Descripción	Código EN 643
SK1: cartón y recorte kraft usado.	Recorte kraft usado, mezcla cartón y kraft 20%-30%	N/A
PNP: recorte kraft sin usar.	Kraft ondulado sin usar (+40%). Únicamente con caras kraft, cara medio ondulado fluting.	4.01.01
KRF: kraft fruta-	Kraft ondulado con mínimo 1 cara kraft.	4.03.00
BPG: bolsas PG pre-consumo	Bolsas kraft. Bolsas perros y gatos.	N/A
PIN: sacos pienso.	Sacos de papel kraft usados y limpio, sin resistencia a la humedad.	4.04.00
SNP: sacos nuevos con plástico.	Sacos de papel kraft sin usar, con plástico, sin resistencia a la humedad.	4.05.00
LIN: kraft Liner.	Kraft sin usar (recortes, papel y cartón kraft de color natural), sin caras de color gris.	4.07
CAE: kraft carrier.	Kraft resistente nuevo, resistente en húmedo o no, y/o impreso (sin caras de cartón gris).	4.08.00



Imagen 1: Pilas de balas de las calidades PAL, TPK y PMA



Imagen 2: Pilas de balas de las calidades SKN, KRF y PNP



Imagen 3: Pilas de balas de las calidades SK1, CAE y PIN



Imagen 4: Pilas de balas de las calidades SNP, BPG y LIN

Propiedades analizadas

Las fibras de las distintas calidades de materia prima se analizaron con un equipo de laboratorio especial y destinado únicamente a dicho fin. Este equipo (versión de laboratorio) se encuentra dentro de las instalaciones de la empresa productora de papel. El equipo lo suministro la casa comercial TechPap y su nombre comercial es MorfiNeo.

El equipo MorfiNeo, que se muestra en la Imagen 5, consta de una plataforma giratoria con posiciones para 5 muestras y un blanco de agua destilada. Debe estar conectado a un ordenador donde está instalado el software del equipo. Interiormente, el equipo tiene una cámara óptica con un visor por donde pasan las fibras y se van produciendo las mediciones; también tiene un circuito hidráulico con bombas, válvulas y un depósito de agua. La cámara de medición sirve para analizar la pulpa en consistencias bien definidas. La resolución óptica se establece en 5 μm mientras que la resolución de trabajo se reduce a 2 μm gracias a un tratamiento de imagen específico basado en análisis de nivel de gris.

El equipo realiza fotografías de forma continua de las muestras (fibras a analizar) y mediante un potente software informático, analiza estas fotografías para determinar las diferentes características que definen la morfología de las fibras. El equipo detecta cada una de las fibras que forman parte de la muestra y determina su longitud, anchura, curvatura, etc.

Finalmente, el equipo realiza los cálculos pertinentes para determinar los promedios y otros valores de las muestras, ofreciendo un resumen en formato visual con tablas y gráficos.

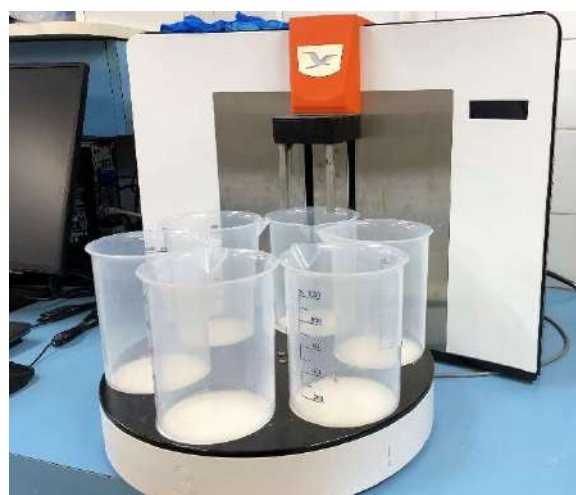


Imagen 5: Equipo analizador de fibras "MorfiNeo"

Con la muestra preparada y acondicionada para su medición, el equipo empieza la serie de medición hasta detectar 5000 fibras leídas, luego detiene la medición. Los resultados los muestra en forma de archivo de texto, para poder exportarlo a formato .xlsx y también entre un documento en formato .pdf con gráficos realizados, como se muestra en la Imagen 6.

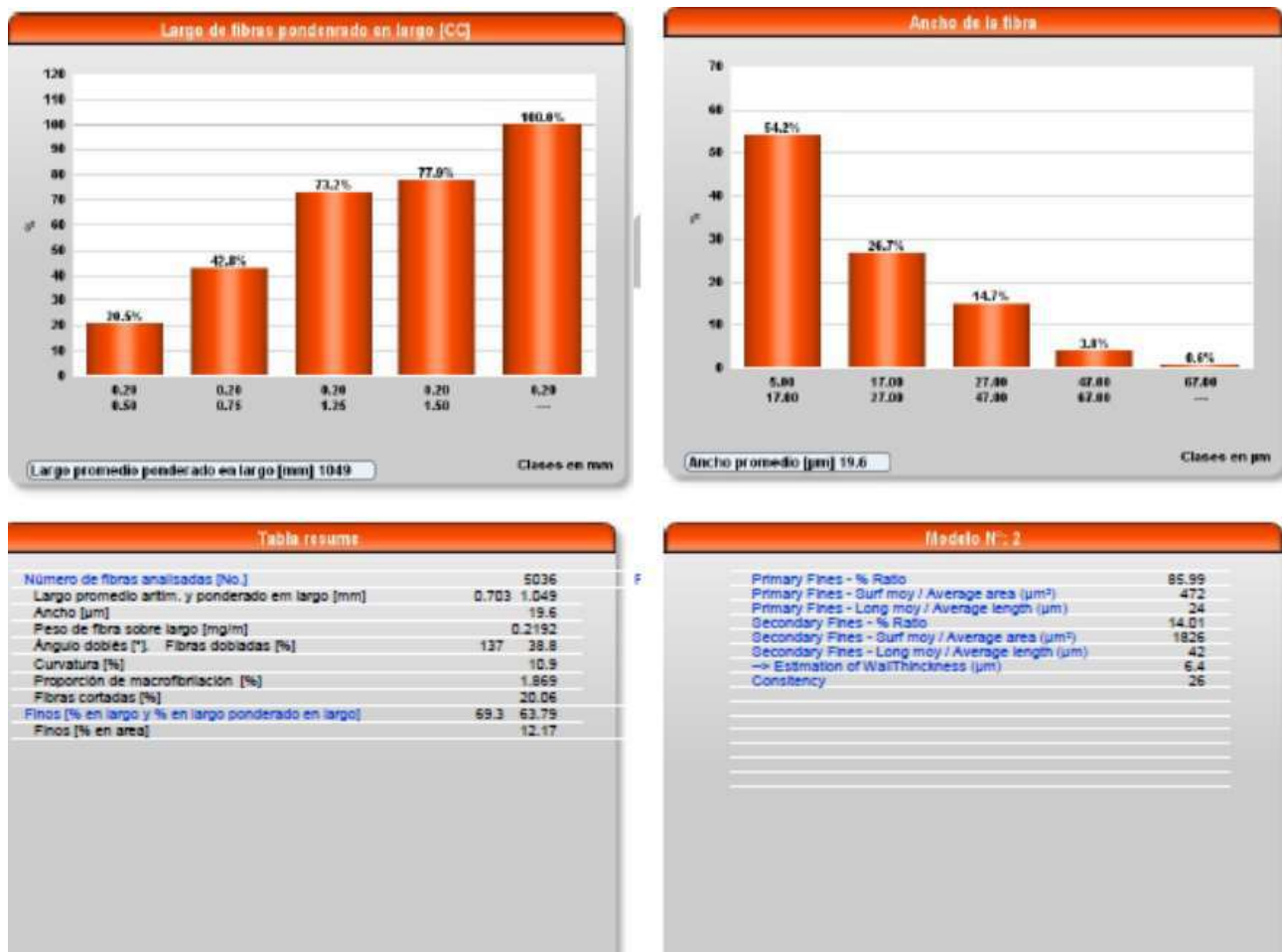


Imagen 6: Documento de resultados del análisis realizado con MorfiNeo

El equipo tiene capacidad para analizar una gran cantidad de parámetros muchos de los cuales no son utilizados en este estudio debido a que no ofrecen información relevante para el mismo ya que algunos de ellos no tienen impacto sobre la fibra analizada al ser 100% recuperada.

Las distintas propiedades que analiza el equipo y su descripción son las que se detallan a continuación. También se mencionan las descartadas en el estudio, así como la razón por la que se descartan.

- **Consistencia:** El equipo necesita trabajar con la pulpa diluida para poder realizar los ensayos correctamente, esta información se considera útil para verificar las condiciones de ensayo, pero no afectan a la morfología de la fibra, por esta razón se descarta.
- **Longitud de fibras en largo ponderado:** después de tener las fibras desenroscadas y sin cruzar en orden para reconstituir los elementos (Imagen 7), se obtiene la longitud de cada fibra. Los valores de longitud son calculados desde un marco de referencia de la fibra, siguiendo la columna vertebral de la misma, segmento por segmento, no es solo la distancia entre dos puntas. En particular la longitud de fibra en largo ponderado se calcula como: La sumatoria es finalizada cuando las fibras han sido detectadas por completo.

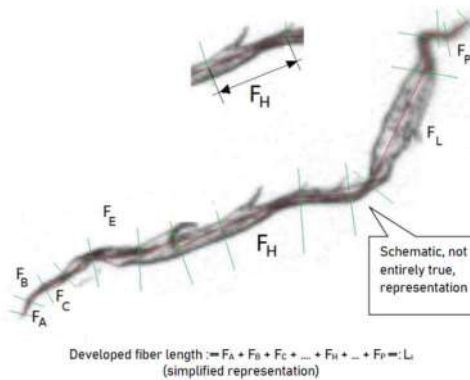


Imagen 7: Descripción del proceso de medición de longitud

- **Ancho:** los valores de ancho son calculados en todo el largo de la fibra, junto con la longitud. Se obtiene un valor medio muy fiable gracias a que se evita cualquier elección arbitraria de un único punto de la fibra.
- **Peso de fibra sobre el largo:** se define como la masa por unidad de longitud. Se calculan los valores de la relación entre la masa de las fibras y el total de sus longitudes individuales. Para obtener la masa, se cuenta el número de imágenes analizadas. Conociendo el volumen de pulpa por imagen, obtenemos el volumen total medido de pulpa. A medida que se define la consistencia de la fibra, se puede calcular la masa total. La longitud total tiene en cuenta todas las longitudes de la imagen, incluso aquellas fibras que de otro modo fueron "descartadas" cuando estaban parcialmente fuera de la imagen. El margen de error relativo es mayor que para otras cantidades debido a las numerosas fuentes de error, que incluyen: contenido de elementos no fibrosos, errores sistemáticos y estadísticos de la medida de longitud, errores de la consistencia de la pulpa.
- **Dobleces o pliegue:** Las torceduras son puntos donde las fibras cambian repentinamente de orientación (Imagen 8). En estos puntos, es probable que las fibras se rompan, de ahí su importancia. El software produce: la proporción de fibras retorcidas, en porcentaje: fibras dobladas, el número medio de curvas por fibra y la distribución del ángulo de pliegue y el promedio del ángulo de pliegue, en grados: ángulo de doblez.

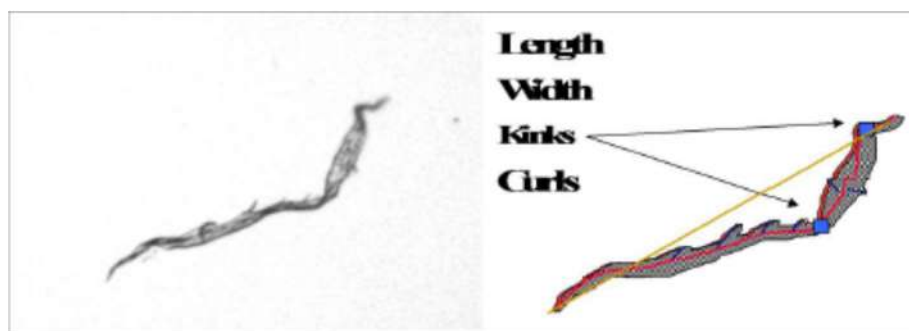
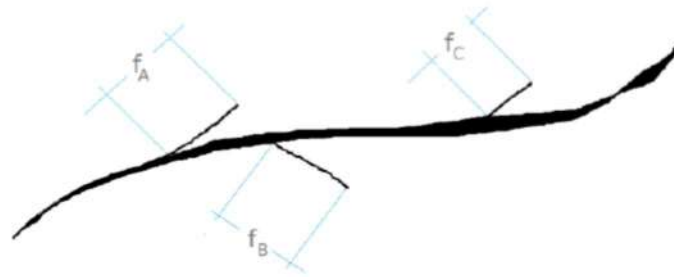


Imagen 8: Interpretación gráfica de las dobleces (kinks)

- **Proporción de macrofibrilación:** se toman, resumidas por separado, las siguientes longitudes: las de todas las fibrillas observadas y las de todas las fibras reconocidas. El índice de fibrilación es la relación de estas dos sumas. Supongamos que i es el índice de cada fibra medida, sea fX (fA , fB , fC ...) la longitud de las fibrillas individuales en cada fibra y Fi la suma sobre ellas, lo que constituye la longitud total de las fibrillas de la misma fibra indexada " i " (Imagen 18). Sea, por otro lado, Li la longitud desarrollada de esa fibra, como se definió antes.

$$\text{Índice de macrofibrilación} = \frac{\sum_{i=1}^N Fi}{\sum_{i=1}^N Li}$$



$$\text{Fibrils' cumulated length per fiber} = f_A + f_B + f_C + \dots = F_i$$

Imagen 9: Representación gráfica del cálculo de la proporción de macrofibrilación

- **Fibras cortadas:** El equipo considera que las fibras están cortadas en caso de detectar ángulos o cambios de dirección bruscos en las fibras. Estas torceduras son puntos donde las fibras cambian repentinamente de orientación. En estos puntos es probable que las fibras se rompan, de ahí su importancia.
- **Finos:** son todos los elementos con longitudes debajo de la longitud mínima de las fibras o un ancho menor al ancho mínimo de las fibras. Las fibras tienen una longitud comprendida entre 200 y 10000 μm .
 Longitud de finos < 200 μm
 Ancho de los finos < 5 μm
 Una característica novedosa de MorfiNeo es la distinción entre finos primarios y secundarios. Se supone que los primarios provienen de la etapa de desfibración, es decir, el proceso de desintegración que transforma las astillas de madera en fibras individuales. Consisten esencialmente en células de parénquima, células de radios, médula y vasos (pequeños). Por tanto, no son restos de fibra. Sin embargo, los finos secundarios son partículas largas y en forma de cinta que se supone que provienen de fibras y fibrillas cortadas bajo esfuerzo cortante (proceso de refinamiento).
 Es un valor heurístico más que sofisticado: cada imagen de la cámara tiene elementos contrastantes, que cubren una gran cantidad de píxeles. "¿Cuántos píxeles están cubiertos en total y cuántos están cubiertos solo por elementos finos?". Porcentaje del número de píxeles que contrastan con elementos finos sobre el número total de píxeles que contrastan (porcentaje).
 Fines % length = (Total length of all fines) / (total length of fines + total length of fibres).
 Fines % area = (Total area of all fines) / (total area of fines + total area of fibres).
 En este caso es importante remarcar que algunos de los datos que ofrece el equipo son complementarios. Como se ha comentado, los finos se dividen en primarios y secundarios, por lo tanto, si se tienen en cuenta los primarios, no hace falta tener en cuenta los secundarios ya que estos son el resto. Por esta razón se han obviado todos los valores referentes a los finos secundarios.
- **Fibra Larga / Fibra Corta:** Estas propiedades son complementarias entre ellas. En el estudio realizado y del cual se han recogido los datos para este estudio, se dividieron las fibras en cortas o largas según su longitud. La división se realizó de forma subjetiva marcando un valor estimado para ella, únicamente para crear esta división.
- **Zero-Span:** Esta propiedad se refiere a la resistencia a la rotura por tensión de la fibra. Este parámetro no lo ofrece el equipo MorfiNeo, se obtuvo mediante otro método de ensayo distinto y se considera de interés en este estudio ya que puede afectar de forma importante en las propiedades del papel producido y en parte está dado por la tipología de la fibra en función de su origen (especie vegetal, proceso de obtención, etc.) con lo cual, se considera que es un parámetro de la fibra que depende de su morfología si bien el equipo MorfiNeo no es capaz de analizar.

Grupos funcionales

Los grupos funcionales en los que la empresa ha dividido las distintas calidades de papelotes y que sirven como punto de partida para la realización del presente estudio son las que se detallan a continuación. Se detalla que calidades de materia prima están incluidas en cada uno de estos grupos funcionales:

- Relleno: SKN, PMA, SK1 y PAL.
- Estructura: BPG, PNP y KRF.
- Resistencia: TPK, CAE, SNP y PIN.

Estos grupos de calidades tienen valores realmente aproximados de los parámetros medidos descriptos anteriormente. Es por esto por lo que se decidió agruparlos y darles ciertas características en común. Si bien, es mediante el presente estudio que se pretende tener una justificación matemática para poder tomar la decisión de cuáles son las calidades más similares.

Los grupos funcionales son la única clasificación de materia prima que se utilizará para el presente estudio ya que se considera que estos grupos son los que realmente pueden ser definidos en función de la morfología de las fibras.

RESULTADOS:

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el estudio. Los resultados son mostrados en formato de imágenes/gráficos.

La primera imagen corresponde al resultado del análisis Cluster realizado con los datos de inicio. En este gráfico se pueden observar los distintos grupos que se han formado y cuáles son las distintas materias primas que forman parte de cada uno de estos grupos.

Como se ha comentado en varios puntos de este informe, se han mantenido los tres grupos funciones que la empresa tenía definidos, únicamente se han reclasificado las calidades de papelotes dentro de cada uno de los grupos.

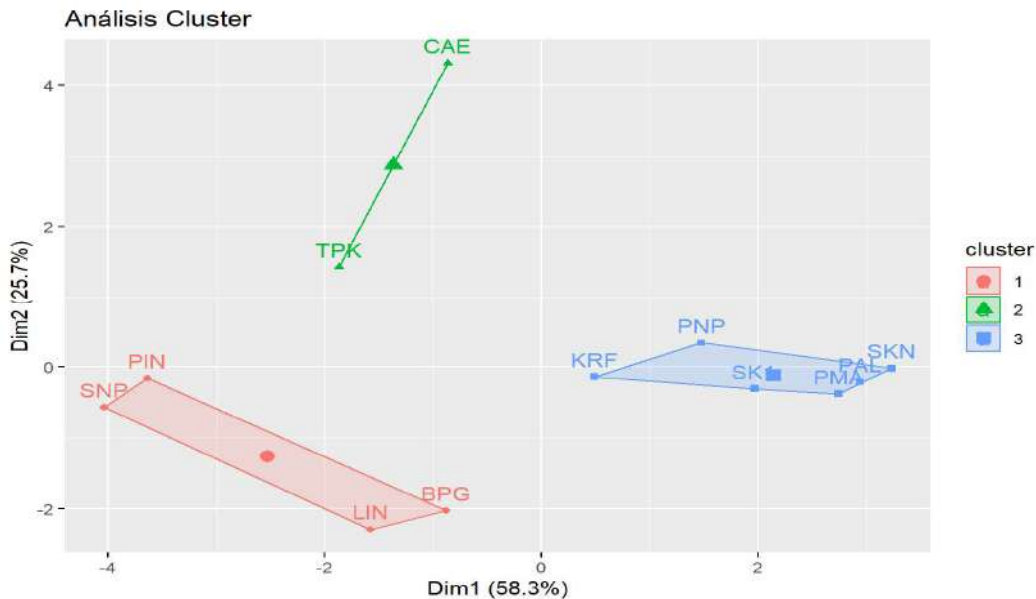


Imagen 10: Resultado agrupación Cluster de las calidades de materias primas

En la siguiente imagen se representa el dendograma obtenido en el estudio. Como se observa y se detalla en apartados posteriores, se han elegido 3 grupos principales en el estudio, si bien, en el dendograma se muestran todos los subgrupos ya que se considera que son de interés para la finalidad del presente estudio.

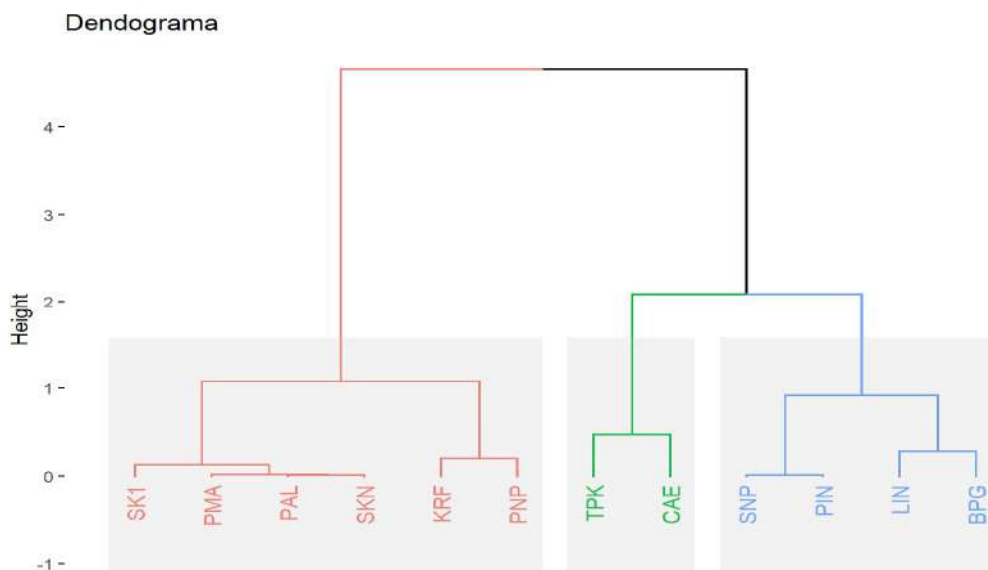


Imagen 11: Dendograma representativo de las calidades de materias primas

Las siguientes imágenes corresponden a la calidad de la representación de los individuos, tanto en el eje 1 como en el eje 2. En estos gráficos se detalla que calidades de materia prima están mejor representadas en cada uno de los dos ejes.

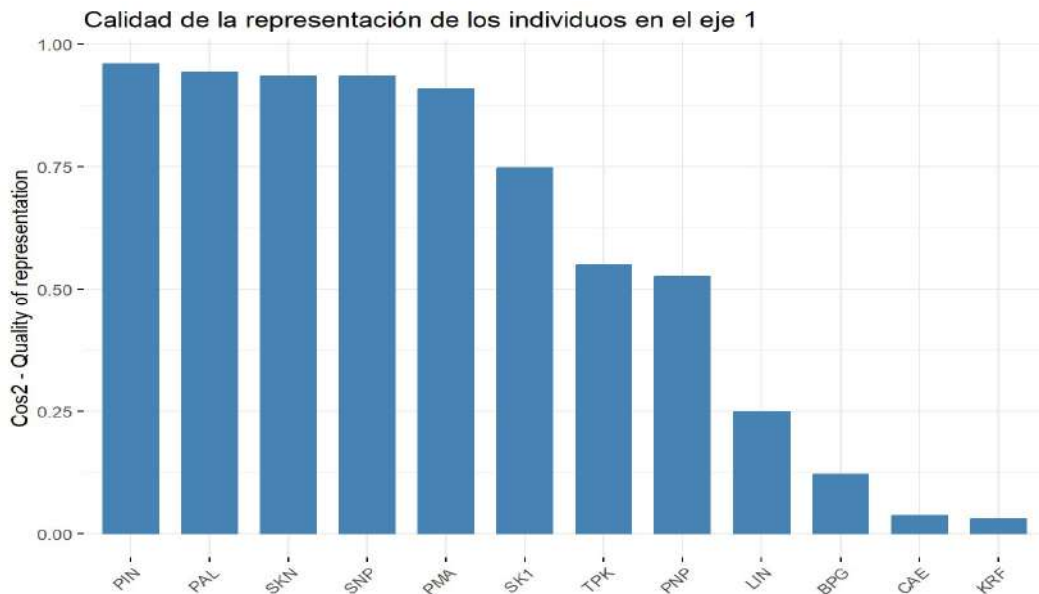


Imagen 12: Gráfico de la calidad de la representación de los individuos en el eje 1

El siguiente gráfico es similar al anterior, pero referenciado al eje 2, es decir, cuáles son las calidades de materia prima que estarían mejor representadas en dicho eje.

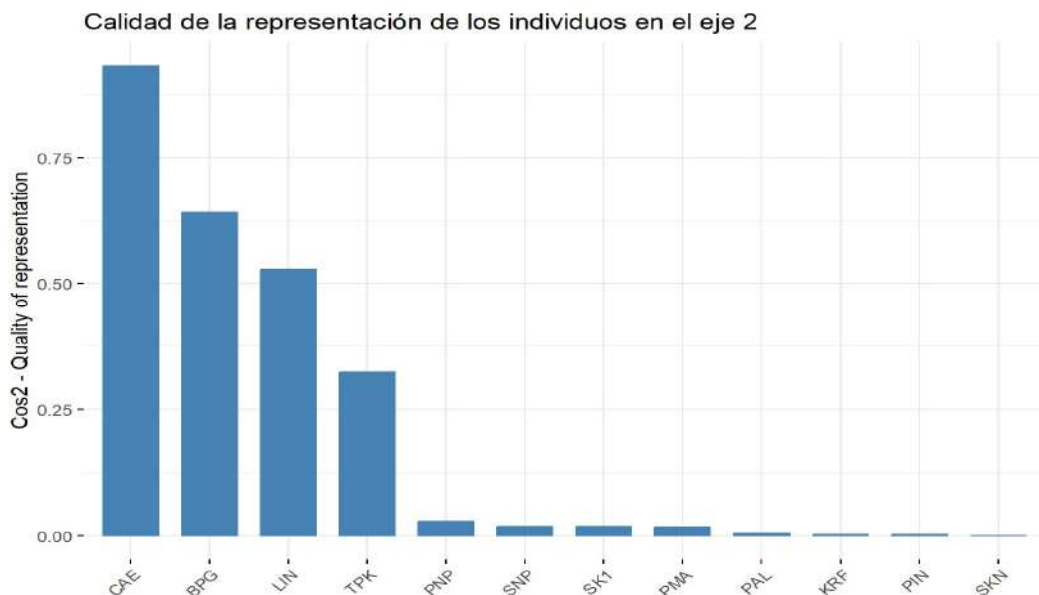


Imagen 13: Gráfico de la calidad de la representación de los individuos en el eje 2

Los dos gráficos que se muestran a continuación corresponden a la contribución de cada uno de los individuos en el eje. En estos gráficos se muestra una línea horizontal que dividiría las materias primas que presentan una contribución en cada uno de los ejes, de las materias primas que no contribuirían a la representación en ese eje.

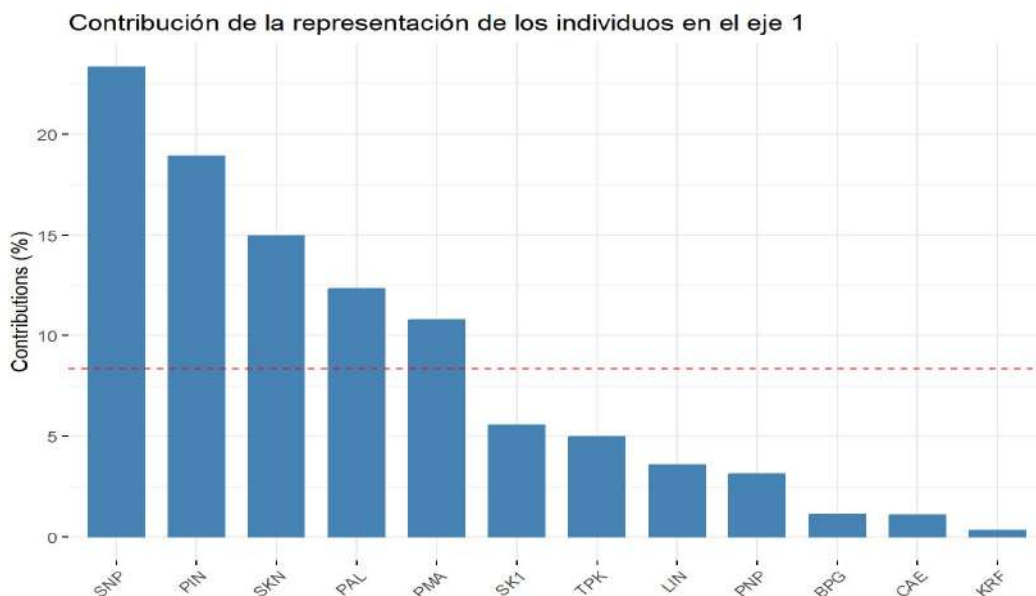


Imagen 14: Gráfico de la contribución de los individuos en el eje 1

Al igual que en el caso anterior, se muestran los mismos resultados que el la Imagen 14, pero correspondiente al eje 2.



Imagen 15: Gráfico de la contribución de los individuos en el eje 2

Finalmente, se muestra la imagen correspondiente a como se reparten las distintas materias primas en función de los dos ejes utilizados para su clasificación.

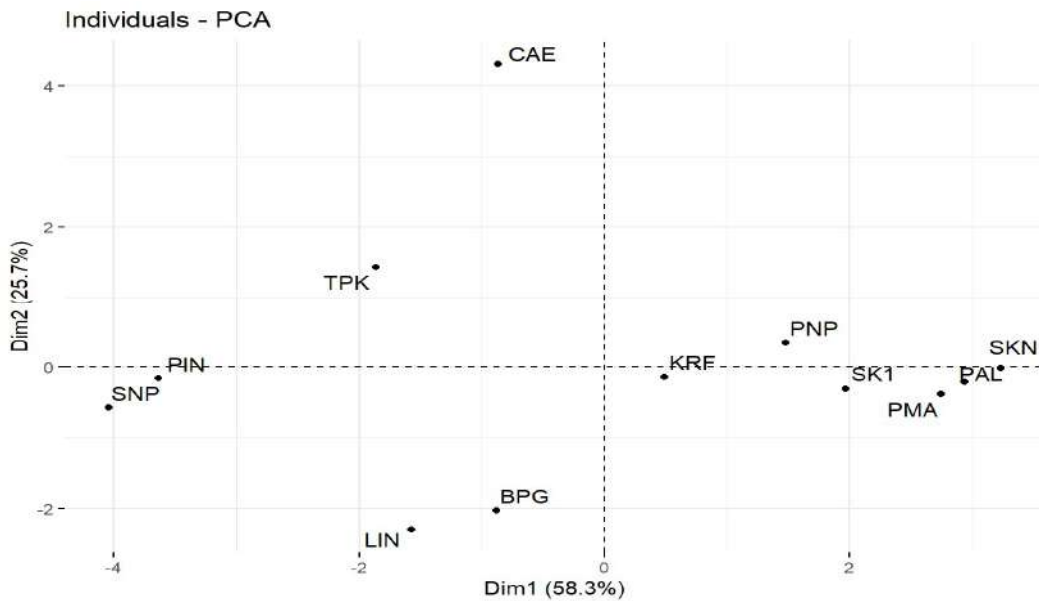


Imagen 16: Gráfico de representación de las calidades en los ejes

En los siguientes gráficos se muestran las mismas representaciones que en los gráficos precedentes, pero referenciadas a las variables en lugar de a los individuos.

En primer lugar, la calidad de las variables en el eje 1, seguido del gráfico de la calidad de las variables en el eje 2.

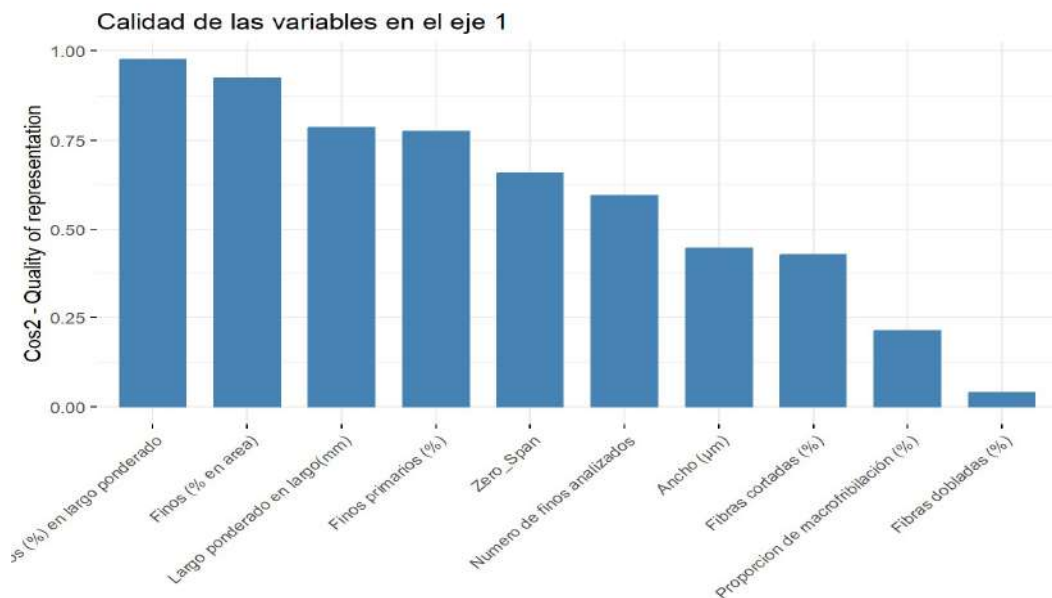


Imagen 17: Gráfico de la calidad de la representación de las variables en el eje 1

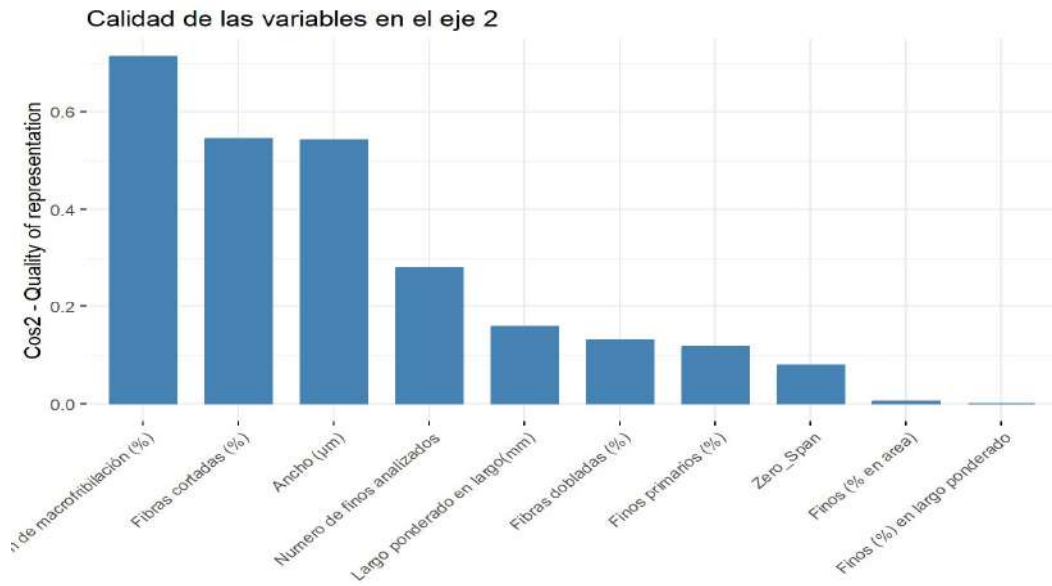


Imagen 18: Gráfico de la calidad de la representación de las variables en el eje 2

En los siguientes dos gráficos se muestra la contribución de las variables en cada uno de los dos ejes.

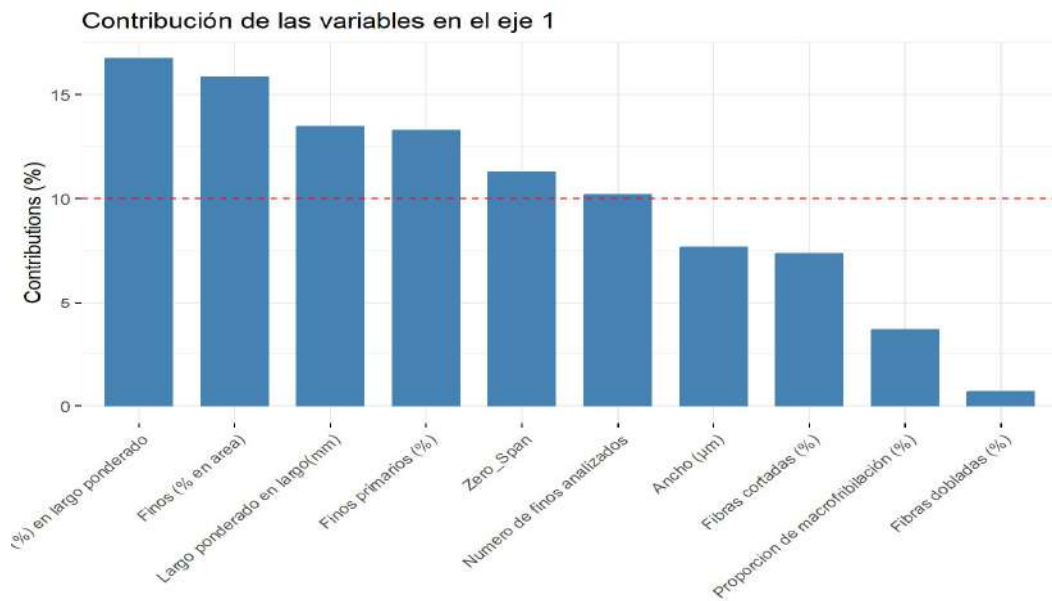


Imagen 19: Gráfico de la contribución de las variables en el eje 1

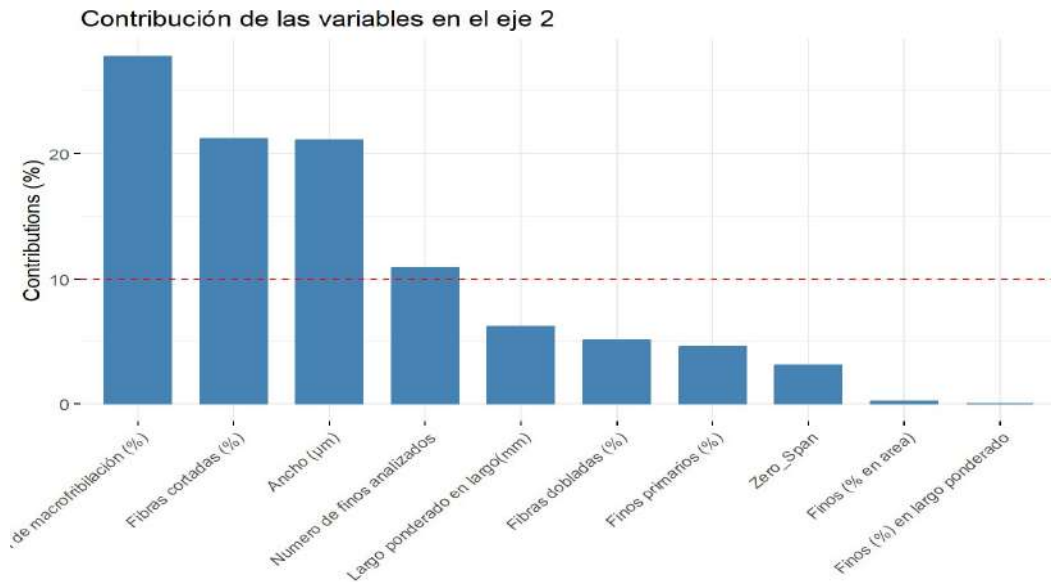


Imagen 20: Gráfico de la contribución de las variables en el eje 2

Seguidamente se muestra el gráfico de la representación de las variables. En este gráfico se detalla en que eje tiene aportación cada una de las variables y cuan fuerte es esta aportación. En el gráfico se muestran todas las variables analizadas.

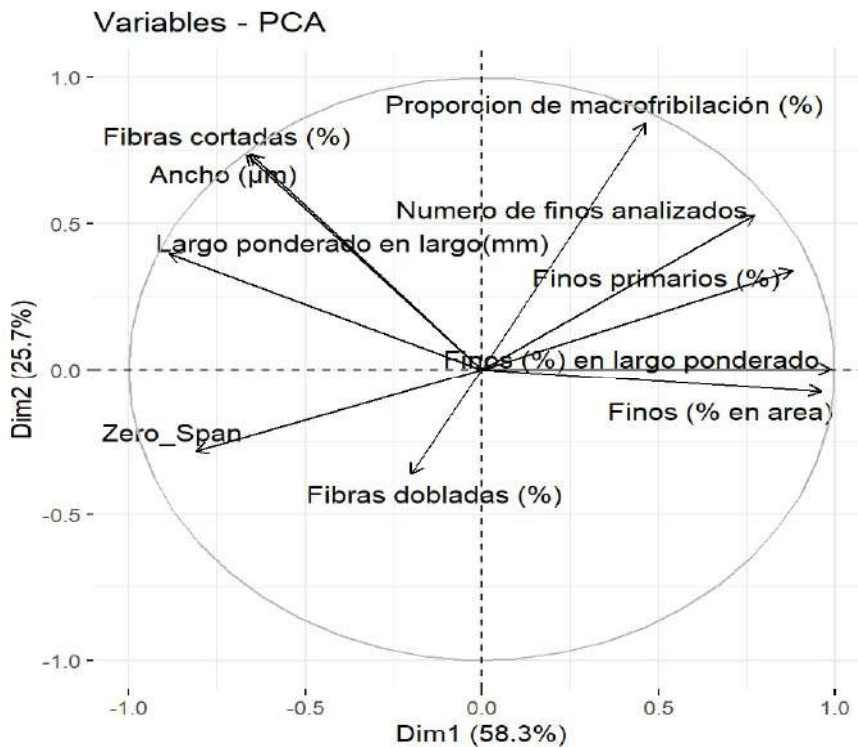


Imagen 21: Representación de las variables

Finalmente se muestra la imagen "biplot" donde se incluyen tanto las variables analizadas en el estudio como las materias primas que forman parte de este. En este gráfico se muestran únicamente las más importantes de ellas.

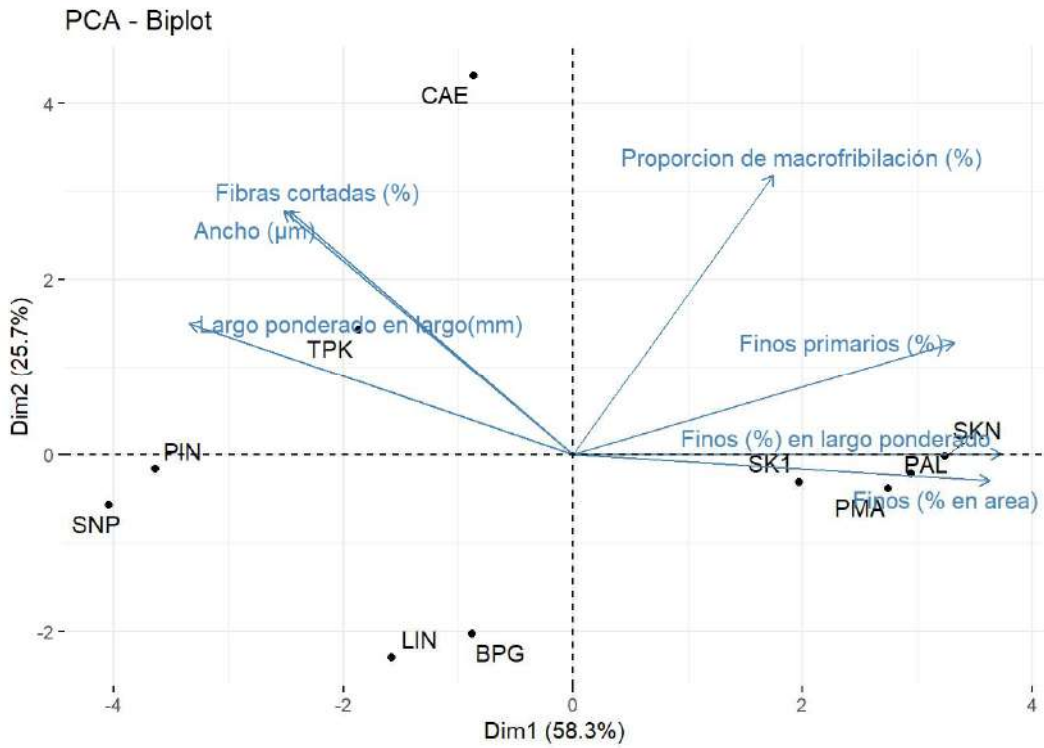


Imagen 22: Gráfico biplot de los resultados obtenidos

DISCUSIÓN:

El primer paso para el estudio, teniendo en cuenta que se trata de un estudio estadístico de datos recogidos tras en análisis de la materia prima en un laboratorio real con equipos reales, es analizar la validez de dichos resultados.

En primer lugar, se ha analizado que no existan datos perdidos ni outliers (puntos atípicos). Teniendo en cuenta que los datos proceden de otro estudio universitario, no es de extrañar que no existan datos perdidos ni outliers. Con estas validaciones realizadas, se prosigue con el estudio.

Grupos funcionales

En el estudio realizado, por similitud a los datos de origen y por las propias necesidades de la empresa que consume los papelotes, se han tenido en cuenta tres grupos de materia prima distintos, diferenciados entre ellos por su funcionalidad dentro de la producción del papel. En el análisis Cluster realizado se ha fijado este número de grupos, ya que es una de las principales hipótesis, se considera que la materia prima puede otorgar estas tres distintas funciones (estructural, resistencia o relleno) al papel producido. Dentro de cada uno de los tres grupos se pueden ver varios subgrupos, también de interés para este estudio, tal como se describirá posteriormente.

En la Imagen 10 se pueden ver bien diferenciados estos tres grupos y cada una de las materias primas que forman parte de ellos. Como se observa, los individuos o calidades de materias primas que forman parte de cada uno de los grupos no son los mismos que se habían definido por la empresa en base a la “experiencia” y que son los que aparecen en la tabla de datos utilizados como origen para este estudio. Este hecho indicaría que, o bien la clasificación previa realizada por la empresa no era la correcta, o bien no se había realizado siguiendo los mismos criterios utilizados en este estudio. Es importante recordar en este punto que, la clasificación de las materias primas en los diferentes grupos se ha realizado según su morfología de las fibras que las constituyen y que la inclusión o exclusión de distintos parámetros podrían modificar los resultados obtenidos. En este estudio no se han tenido en cuenta temas económicos (coste de compra de la materia prima), de procedencia de la materia prima (preconsumo o postconsumo), de su clasificación como papel en su primer uso (cartón para cajas, de transporte, cartoncillo para cajas pequeñas, etc). Como cualquier estudio de este tipo, las restricciones iniciales o las hipótesis utilizadas pueden modificar los resultados obtenidos.

Se ha representado en la Imagen 11 el dendograma obtenido teniendo en cuenta esta clasificación inicial en tres grupos y también los posibles subgrupos que se pueden generar. En este gráfico se puede observar que dentro de los tres grupos hay diferentes subgrupos, hecho que indica que se hubiesen podido realizar otras agrupaciones de más o menos grupos. Como se ha comentado anteriormente, una de las hipótesis utilizadas en el estudio es que las materias primas se dividen en 3 grupos. Si bien, el dendograma puede ser de gran utilidad para poder elegir materias primas alternativas, es decir, en caso de falta de una de ellas, poder sustituirla por otra de similares características. El hecho de poder utilizar una materia prima similar a otra puede ser de gran utilidad ya que en función de la disponibilidad de esta o del coste económico, esta elección puede ser de gran interés. Conocer cuales de las materias primas son más parecidas entre ellas en cuanto a la morfología de sus fibras y por lo tanto a las propiedades que pueden otorgar al papel producido puede ser de gran ayuda para los usuarios de estas materias primas, tanto o más que la clasificación en grupos.

Como se puede observar en el dendograma, en mayor o menor medida, todas las calidades de materias primas tienen otra de muy similar que podría ser su sustituta. Prácticamente todas las calidades tienen otra calidad que formaría parte del mismo subgrupo. Este resultado es de gran importancia para poder decidir qué materia prima se puede utilizar en caso de necesidad por falta de una de ellas o por necesidad económica de no utilización de una de ellas.

Por lo tanto, los datos obtenidos hasta el momento son de gran utilidad para poder clasificar las materias primas en tres grandes grupos, en función de la morfología de sus fibras y también para encontrar los subgrupos que incluyen a las más similares y, por lo tanto, a las que serían alternativas unas de otras.

Principales componentes

Justificación

Después de ver que no hay valores perdidos en los datos y que tampoco hay outliers, el análisis de componentes principales muestra, tanto mediante un gráfico de sedimentación como con el análisis paralelo de Horn, que basta con dos componentes principales para realizar el estudio de forma correcta.

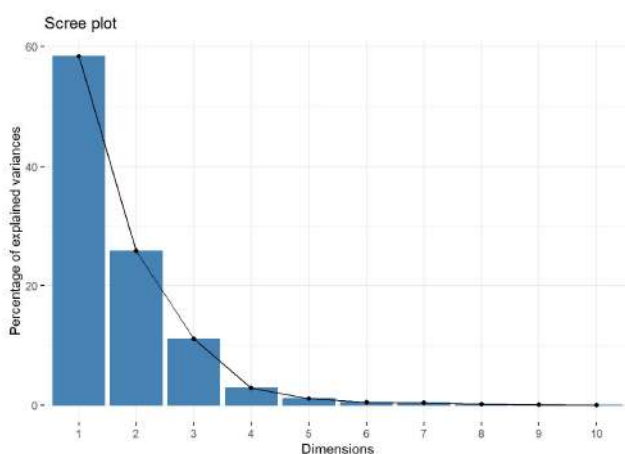


Imagen 23: Gráfico de sedimentación

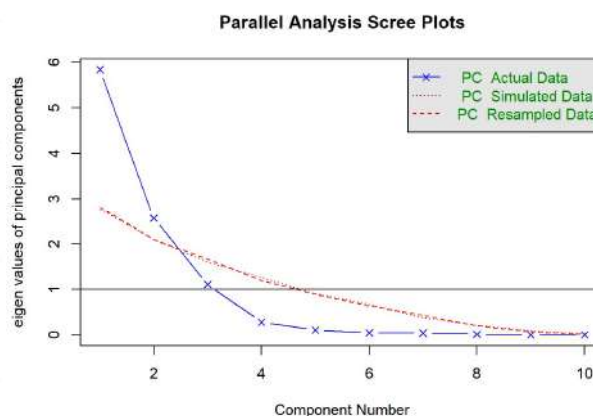


Imagen 24: Análisis paralelo de Horn

Antes de la realización del estudio PCA se ha analizado si este era apropiado, obteniendo en la prueba de esfericidad de Barlett un p-Value de $5,57e-17$, por lo tanto, se puede decir que las variables del estudio no son una matriz identidad en la que las correlaciones ocurren solo por un error de muestreo.

De la misma forma, en el estudio previo se observa que la propiedad "Fibras dobladas (%)" ofrece un valor muy bajo en la adecuación muestral KMO, este hecho reafirma que esta propiedad no es influyente en este estudio, tal como se describe en este mismo apartado.

Finalmente, también se ha visto que el determinante de la matriz correlación es positivo, por lo tanto, se han satisfecho todos los supuestos para el análisis de componentes principales.

Agrupaciones

Siguiendo con el estudio, se ha visto que cada una de las dos dimensiones influenciada en mayor o menor parte por las propiedades que describen a las fibras. También se ha analizado cuales de las materias primas están más bien identificadas por cada una de las dimensiones del estudio. En estos análisis se ha estudiado tanto la calidad como la contribución de cada una de las materias primas y de las variables que las describen.

Como se ha comentado en otros apartados, el estudio se ha basado en la hipótesis de la existencia de 3 grupos funcionales de calidades de materias primas. Si bien, los resultados obtenidos muestran que las calidades de materias primas que forman parte de cada grupo no son las mismas que se habían establecido por la empresa consumidora de estas antes del estudio. La organización de las calidades se muestra en la siguiente tabla donde se pueden observar estos cambios de los distintos grupos funcionales.

Tabla 3: agrupación de materias primas en grupos funcionales

	Grupos funcionales		
	1	2	3
Estructura	2	0	1
Relleno	4	0	0
Resistencia	0	2	3

Una vez definidas las calidades de materia prima que forman cada grupo es importante conocer las razones de esta clasificación. Se analiza la calidad y la contribución de las distintas materias primas dentro de cada grupo, así como la calidad y la contribución de cada propiedad de las fibras analizadas.

Calidad y Contribución

En esta parte del análisis se debe tener en cuenta tanto la calidad como la contribución referente a los individuos o calidades de materias primas, así como las referentes a las variables o propiedades de estas materias primas.

En cuanto a los individuos o materias primas, es importante notar que hay un gran grupo de unas 8 materias primas que tienen una gran calidad en cuanto al primer eje, es decir, que están bien correlacionadas por las propiedades que definen dicho eje, en cambio, hay dos calidades que no están definidas por el eje 1. Como se puede ver con la observación de los dos gráficos, hay una materia prima (KRF) que no está bien representada por ninguno de los dos ejes. Por otro lado, la materia prima "TPK" estaría bien representada por ambos ejes.

Por otro lado, se puede observar que son 3 las materias primas que están bien correlacionadas en el segundo eje.

En cuanto a la contribución, en el primer eje o primera dimensión (sin definir el sentido), se observa que son 5 las materias primas que contribuyen en ese eje y 3 las que tienen gran contribución en el segundo eje.

En la Imagen 16 se puede observar que son 6 las materias primas que se encuentran en el sentido positivo del primer eje y 2 las que se encuentran en el sentido negativo del eje.

En cuanto a las variables, hay 6 de ellas que presentan una gran calidad en el eje 1, todas ellas con una gran contribución y 3 con gran calidad en el eje dos y gran contribución. Una cuarta propiedad tiene contribución en el eje 2, pero su calidad no es buena.

Las propiedades de las fibras que más correlacionan a las distintas calidades de materias primas que se encuentran en el primer eje y en sentido positivo son las que describen los finos (fibras menores de 200 micras) que forman parte de estas, y en el otro sentido del eje son las que describen la fisiología de las fibras, es decir, su tamaño (longitud y anchura).

En cambio, las propiedades que más correlacionan las calidades de materia prima que se encuentran en el segundo eje son las correspondientes al estado de las fibras, en este caso, si están fibriladas o cortadas.

En el estudio también se puede observar como la propiedad que describe las fibras dobladas no tiene mucha importancia en ninguno de los casos.

En la Imagen 22, se puede observar de manera gráfica cuales son las principales propiedades que definen a los grupos en cada uno de los ejes y cuáles son las materias primas que más representadas estarían por cada eje.

En resumen, se puede ver como las calidades PIN, PAL, SKN, SNP, PMA y SK1 y en menor medida TPK y PNP están definidas por las propiedades Finos (%) en largo ponderado, Finos (%) en área, Largo ponderado en largo (mm), Finos primarios (%), Zero-Span y número de finos analizados.

Otro grupo de materias primas formado por CAE, BPG y LIN estarían definidos por las propiedades Proporción de macrofibrilación, Fibras cortadas (%) y Ancho (mm).

Clasificación

Del análisis general de todos los gráficos obtenidos y representados, se extrae la siguiente clasificación:

- **Grupo 1** del Cluster. Como se observa también en el dendograma, dentro de este grupo 1 del Cluster, se puede encontrar una segunda subdivisión, formada cada una de ellas por dos calidades, unas definidas por las propiedades más representativas del eje 1 y las otras definidas por las propiedades más representativas del eje 2.
 - PIN y SNP están fuertemente definidos por las propiedades que están fuertemente ligadas al eje 1
 - *Zero-Span*
 - *Largo ponderado en largo*
 - LIN y BPG están mejor definidas por las propiedades que definen el eje 2
 - *Macrofibrilación*
 - *Fibras cortadas*
 - *Ancho de las fibras*
 - *Número de finos analizados.*
- **Grupo 2** del Cluster, este está formado únicamente por 2 materias primas:
 - CAE y TPK
 - CAE está fuertemente definida por el eje 2.
 - TPK estaría definida de forma muy similar por ambos ejes, de forma que contribuiría en mayor medida que el eje 1.
- **Grupo 3** del cluster formado por las materias primas fuertemente definidas por las variables que forman parte del eje 1 en positivo
 - KRF, PNP, SK1, SKN, PAL y PMA
 - *Finos (%) en largo ponderado*
 - *Finos (%) en área*
 - *Finos primarios (%)*
 - *Número de finos analizados.*

Por lo tanto, se puede decir que las materias primas analizadas, divididas en 3 grandes grupos, se definen en cuanto al grupo 1 en dos subgrupos, uno con fibras más largas y fuertes y el otro subgrupo por fibras anchas y más tratadas mecánicamente, es decir, más fibriladas, cortadas y con mayor número de finos.

En cuanto a las materias primas que forman parte del grupo 3, estas se definen por su contenido en finos, especialmente los primarios, que a la vez son los más largos y anchos.

El grupo 2 del Cluster estaría formado por 2 materias primas, una de ellas fuertemente definida por las propiedades del eje 2 y la otra definida por propiedades de ambos ejes.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que se pueden clasificar las distintas calidades de materia prima utilizada en la fabricación de papel a partir de papelote (papel reciclado), en tres grandes grupos en según la funcionalidad que sus fibras otorgan al papel en función de su morfología.

Un primer gran grupo con dos subgrupos diferenciados está formado por 4 calidades de materia prima (PIN, SNP, BPG y LIN) las cuales se definen por las propiedades dimensionales de sus fibras (anchura, longitud), el estado de estas (macrofibrilación, cortes) y su resistencia mecánica (Zero-Span).

El mayor de los grupos, formado por 6 calidades de papelote (KRF, PNP, SK1, SKN, PAL y PMA) está definido por las propiedades de los finos que contienen.

El otro grupo está formado únicamente por 2 calidades de materia prima (CAE y TPK) influenciadas por varias propiedades.

La clasificación realizada mediante los resultados del presente estudio difiere de la clasificación inicial realizada por la empresa consumidora de estas materias primas. La clasificación existente hasta el momento no contemplaba la morfología de las fibras, razón por la cual no coincide con la presente.

El presente estudio puede crear una forma distinta de clasificar las distintas calidades de materias primas de forma que esto puede derivar en una mezcla más homogénea que derive en un ahorro de costos de producción y especialmente en una estabilidad del proceso de producción del papel.

Finalmente, se considera que este trabajo puede ser el precedente de un conjunto de trabajos de gran importancia en este campo debido a que los resultados difieren de los conocimientos actuales y pueden tener un gran impacto en las industrias del sector.

REFERENCIAS/BIBLIOGRAFÍA

- Mariana Ferrá Gonzalez. Estudio de la potencialidad de las fibras en la industria del papel reciclado. Trabajo Final de Máster, Máster Universitario en Tecnología Papelera y Gráfica, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Manual de usuario del equipo de laboratorio MorfiNeo de la casa comercial TechPap

ANEXOS

ANEXO A. Datos iniciales para el estudio.

Muestra	Funcion	Schopper	Consistencia	Largo ponderado en largo	Ancho	Peso de fibra sobre largo	Fibras dobladas	Proporcion de macrofibrilación	Fibras cortadas	Finos (%) en largo ponderado	Finos (% en area)	Numero de finos analizados	Finos primarios	Finos primarios	Finos secundarios	Finos secundarios	Fibra larga	Fibra corta	Zero_Span
		(°SR)	(mg/l)	(mm)	(µm)	(mg/m)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(numero)	(%)	(numero)	(%)	(numero)	%	%	(N.m/g)
SKN	Relleno	27,50	32,39	1,04	20,70	0,28	36,70	2,05	22,44	64,59	11,40	360936,00	86,42	311920,89	13,58	49015,11	38,41	61,59	90,61
PMA	Relleno	28,00	32,39	1,04	20,70	0,28	36,70	2,05	22,40	64,59	11,40	324125,00	85,76	277969,60	14,24	46155,40	34,21	65,79	100,11
PAL	Relleno	33,50	28,15	1,10	20,50	0,23	35,50	1,97	21,71	61,37	10,59	341180,00	86,50	295120,70	13,50	46059,30	41,41	58,59	90,43
SK1	Relleno	31,00	29,96	1,19	21,00	0,24	37,60	2,04	22,18	60,87	8,54	353665,00	85,58	302666,51	14,42	50998,49	46,60	53,40	112,58
PNP	Estructura	29,00	25,30	1,29	22,90	0,24	31,20	1,92	25,34	56,83	10,49	325872,00	85,72	279337,48	14,28	46534,52	53,11	46,89	119,03
KRF	Estructura	23,00	26,57	1,28	22,60	0,21	27,50	1,81	23,70	49,83	6,58	251848,00	86,55	217974,44	13,45	33873,56	50,07	49,93	131,26
BPG	Estructura	26,50	28,55	1,49	20,60	0,19	39,45	1,68	21,30	44,95	5,80	255537,87	82,72	211888,73	17,28	43649,14	52,23	47,77	134,87
LIN	Resistencia	17,00	25,29	1,28	22,30	0,18	35,10	1,30	23,25	40,67	3,95	168261,00	82,70	139151,85	17,30	29109,15	53,49	46,51	117,48
PIN	Resistencia	20,19	36,89	2,27	26,59	0,30	37,94	1,58	30,04	34,93	2,76	225032,00	82,16	185163,11	17,85	39868,89	85,61	14,39	138,64
TPK	Resistencia	16,27	38,69	1,90	27,67	0,32	32,75	2,04	30,96	43,45	4,05	244567,40	84,38	206312,37	15,62	38255,03	72,50	27,50	129,49
SNP	Resistencia	19,19	35,12	2,23	26,03	0,25	39,39	1,55	30,86	33,50	2,63	192063,21	81,88	157446,66	18,12	34616,56	82,10	17,90	143,65
CAE	Resistencia	14,56	39,47	2,10	30,65	0,44	33,55	2,59	35,75	44,34	4,32	373375,13	85,17	318213,67	14,83	55161,46	82,44	17,56	100,44