



**PROTOTIPO SOSTENIBLE PARA LA FABRICACIÓN DE PAPEL  
HIGIÉNICO A PARTIR DE RESIDUOS DE CÉSPED CORTADO**

ARNOLD STEVEN ESPITIA MELO  
VALENTINA TORRES HUERTAS  
KELLY YOANA FUENTES NOVA

**UNIVERSIDAD EAN**  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE PROCESOS Y CALIDAD  
SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN

## RESUMEN

Dentro de las crisis ambientales que enfrenta el siglo XXI y que amenaza la existencia de los ecosistemas, se encuentra el aumento desmedido de la deforestación la cual no solo lleva a la pérdida del hábitat de especies, el aumento de la huella de carbono, sino también conflictos sociales especialmente con tribus indígenas habitantes de territorios vírgenes como la Amazonía. Una de las industrias que más impactos negativos genera en el ámbito de la deforestación es la papelera ya que no solo impacta en la tala de árboles para extraer la materia prima (celulosa) sino también en el proceso de blanqueamiento del papel en el cual interviene compuestos organoclorados los cuales son catalogados como altamente peligrosos y contaminantes lo que con el tiempo aumenta el nivel de toxicidad en el medio ambiente.

En el presente estudio, se presentan los resultados de una exhaustiva búsqueda bibliográfica sobre los aspectos generales de la industria papelera, los impactos negativos que genera sobre el medio ambiente, los tipos de papel y su producción y finalmente las características más relevantes de la materia prima involucrada en el proceso la cual es el pasto. Así mismo se presenta el diseño del proceso de fabricación que permitió la obtención del mejor prototipo de papel, en este se describe cuáles fueron las variables más importantes que intervinieron en cada una de las etapas del proceso. Finalmente, se presenta el resultado más favorable el cual se obtuvo cuando en la ruta de fabricación se incorporan elementos que ayudan a blanquear la biomasa durante la operación de molienda, así como otros que le aportan mejor consistencia el cual fue el almidón, pues se evidencio que cuando se hace uso de estos se mejoran directamente las características físicas de las láminas de papel como la suavidad y porcentaje de absorción de humedad.

**Palabras clave:** Celulosa, papel, fibras, pasto, sostenibilidad, modelo circular.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	ii
INTRODUCCIÓN .....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
JUSTIFICACIÓN .....	5
OBJETIVOS .....	7
Objetivo general.....	7
Objetivos específicos .....	7
MARCO TEÓRICO.....	8
El papel y su origen.....	8
La industria papelera.....	9
Según la longitud de la fibra. ....	10
Según el proceso de obtención.....	11
Impactos en la industria papelera.....	12
Pasto.....	13
Tipo de forraje.....	13
Uso al cual esté destinado .....	14
Por el ciclo evolutivo .....	14
Por su origen: .....	14
METODOLOGÍA .....	16

Definición de variables .....	17
Limpieza de la Biomasa.....	17
Molienda .....	18
El gramaje de papel.....	18
Formación del papel.....	18
Prensado.....	19
Secado .....	19
Diseño experimental .....	21
Primer caso de ensayo.....	21
Segundo caso de ensayo.....	23
Tercer caso de ensayo .....	24
TÉCNICA DE ANÁLISIS DE DATOS .....	25
Distribución Beta .....	26
Método Pert.....	27
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	29
Primer caso de ensayo.....	29
Segundo caso de ensayo.....	30
Tercer caso de ensayo .....	31
Correlación de variables Pearson.....	39
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	42

CONCLUSIONES ..... 44

REFERENCIAS..... 46

## LISTA DE TABLAS

**Tabla 1.** Operacionalización de variables .....20

**Tabla 2.** Principales variables durante las etapas de fabricación del papel .....34

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama del proceso .....	17
<b>Figura 2.</b> Primer diseño de experimental .....	22
<b>Figura 3.</b> Segundo diseño de experimental .....	23
<b>Figura 4.</b> Tercer diseño de experimental .....	24
<b>Figura 5.</b> Lámina obtenida del primer ensayo .....	30
<b>Figura 6.</b> Lámina obtenida del segundo ensayo .....	31
<b>Figura 7.</b> Lámina obtenida del tercer ensayo .....	32
<b>Figura 8.</b> Diseño del proceso de producción de papel a partir de césped .....	33
<b>Figura 9.</b> Lámina obtenida del cuarto ensayo .....	36
<b>Figura 10.</b> Lámina final obtenida del cuarto ensayo .....	37
<b>Figura 11.</b> Análisis de variables en función de los ensayos.....	38

## INTRODUCCIÓN

El papel higiénico es un producto de uso cotidiano que se encuentra ampliamente presente en la sociedad. Sin embargo, su producción tradicional implica el consumo de recursos naturales no renovables, como la madera, y genera una cantidad significativa de residuos. Ante este panorama, surge la necesidad de explorar nuevas opciones que promuevan la conservación de los recursos y minimicen los impactos ambientales.

En este informe, se lleva a cabo un estado del arte en el cual se examina la literatura científica y las investigaciones existentes relacionadas con la elaboración de papel higiénico desde la historia del papel hasta el uso de césped para fabricarlo. Así mismo, se plantea el problema de la producción convencional de papel higiénico y se exponen los objetivos del estudio, que se centran en la creación de un prototipo funcional y sostenible.

De esta manera, se emplea un método experimental que incluye la recolección de los residuos de césped cortado, su procesamiento y la fabricación del prototipo de papel higiénico. A través de este método, se busca evaluar las propiedades y características del producto resultante, considerando variables clave como su resistencia, suavidad y biodegradabilidad y se realiza el respectivo análisis de las variables frente a los objetivos propuestos. Con base en esta información, se podrán identificar posibles mejoras y recomendaciones para su eventual implementación a mayor escala.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se viene presentando un crecimiento poblacional y una reducción de los recursos naturales para la fabricación de muchos productos que se consideran de primera necesidad. Según como se expone en (Paul & Chowdhury, 2020), desde el año 2019 se ha detectado una inmensurable demanda de artículos esenciales como lo son el desinfectante de manos y el papel higiénico. Para este último en especial, en algunos países como España se registra un incremento de hasta un 25% en la demanda, hecho que se considera como preocupante teniendo en cuenta que las materias primas que se requiere para su fabricación cada vez se encuentran en estado de mayor escasez, una de las principales es la celulosa. El papel higiénico es considerado como una necesidad básica en los hogares, por su parte Colombia es un país que cada día aumenta el consumo de dicho recurso (De la Torre Hasing, 2015) pues, aunque no se cataloga como uno de los lugares donde más se usa papel higiénico con 6 kilogramos por año, éste si se encuentra por encima del promedio de la media mundial que corresponde a 4 kilogramos.

Debido a que cada día aumenta la demanda de papel higiénico en el mercado, también provoca que cada vez hayan menos recursos disponibles para la fabricación del mismo (León Nieto, 2012), de ahí la importancia de generar alternativas sostenibles y amigables con el medio ambiente que permitan suplir aquellas necesidades, lo que evoca a que se generen búsquedas constantes de nuevas materias primas que suplan dichas necesidades pero que a su vez provengan de recursos que normalmente no son aprovechados e incluso de aquellos que en la mayoría de los casos son considerados como desechos, pero que al tratados de la forma correcta se convierten en potenciales soluciones.

Por otra parte, como lo expone (Bocanegra Linares, 2019) uno de los residuos que se genera en gran volumen a la hora de realizar el mantenimiento de distintas zonas verdes en las ciudades es el compostaje o lo que se denomina como poda, pues al ser considerado como

un residuo sin mayor valor, habitualmente termina siendo dispuesto en lugares que violan las legislaciones ambientales.

Actualmente la fabricación del papel higiénico es elaborado principalmente a partir de tres fuentes como lo son la madera virgen la cual proviene en su mayoría de plantaciones forestales, esta representa casi el 30%, en segunda medida también se emplea la fibra virgen del bagazo de la caña de azúcar la cual aporta alrededor de un 12% y finalmente, la fuente más importante corresponde a aquella fibra que es recolectada a partir de residuos de papel después de su consumo, ya que de allí se obtiene más del 60% (ANDI, 2018). Los tres recursos mencionados anteriormente, son la fuente directa de la celulosa la cual se constituye en la materia prima principal a la hora de fabricar cualquier tipo de papel.

Como se evidencia en el párrafo anterior una de las fuentes de obtención de celulosa es por medio de la madera virgen, lo que conlleva un impacto ambiental considerable que no solo afecta directamente a la tala de árboles sino a las consecuencias que se generan por este hecho como lo anuncia la FAO en su apartado de GFS “Otros impactos ambientales de la deforestación incluyen: el daño a los hábitats, su fragmentación y la sucesiva pérdida de biodiversidad; la alteración de los ciclos del agua, la erosión del suelo y la desertificación” (FAO, 2022).

Pues bien, entendiendo lo anterior queda más que claro la producción de papel es una de las industrias que mayor impacto negativo le genera a la naturaleza (Suraj & Khan, 2018), es por esto que cada vez se vuelve más común encontrar que se pongan en marcha proyectos que busquen no solo generar conciencia del uso responsable de los recursos naturales sino también que busquen proporcionar alternativas para alivianar aquellos recursos que se encuentran en escasez. Ahora bien, en busca de proporcionar una solución a lo anterior se cuestiona lo siguiente: **¿Cómo fabricar papel higiénico convencional**

**usando un modelo circular con el fin de disminuir los impactos ambientales negativos que conlleva su producción?**

## JUSTIFICACIÓN

Haciendo énfasis en los impactos ambientales negativos que se generan por la fabricación del papel higiénico convencional como lo son la desertificación, la pérdida de hábitat de especies, los conflictos por la pérdida de territorios de tribus indígenas, el modelo de producción lineal actual y demás impactos descritos anteriormente, se hace necesario proponer alternativas que ayuden a mitigar dichos impactos ambientales. Una de ellas es la obtención de productos de primera necesidad como el papel higiénico a partir de materias primas que provienen de fuentes poco convencionales. Aprovechar la biomasa que se genera luego de la tarea de mantenimiento que conlleva cuidar los jardines de las ciudades, es una buena alternativa que permite el aprovechamiento de residuos que son considerados de poco valor y a su vez disminuyen la tala de árboles y los efectos colaterales que esta conlleva y por otro lado, propone alternativas más amigables de consumo que provocan mayor conciencia en las personas.

El adecuado manejo de los residuos ocupa un importante lugar en la gestión ambiental, por su parte es común que los residuos generados luego de labores de poda sean dispuestos en sitios donde se les da un aprovechamiento como base para compost natural, pero también existen casos donde estos son dispuestos en rellenos sanitarios que con el pasar del tiempo al no tener un tratamiento adecuado se vuelven un problema mayor, pues se descomponen en anaerobiosis, es decir ausencia de oxígeno, lo que provoca una mayor liberación de metano a la atmósfera. Por esta razón, por medio de iniciativas como Ecopast se proponen alternativas para este tipo de residuos que se consideran de poco valor, pero que al recibir un tratamiento adecuado se convierten en potenciales materias primas que son involucradas de nuevo en procesos productivos, lo que conlleva a que se genere todo un proceso de reciclaje para dicho material orgánico y a su vez se elimine el proceso lineal de producción-consumo al ser enviado a un relleno sanitario, pues al incorporarlo al proceso de fabricación

de papel higiénico este puede cerrar su ciclo y volver a la cadena como un producto útil para ser empleado con fines higiénicos o domésticos (Cortés & Fernando, 2018).

Ecopast no sólo es un modelo de fabricación de papel higiénico a partir de los residuos de césped sino también, es una estrategia sostenible que genera valor en la industria papelera, crea consumidores responsables, genera alternativas sostenibles para la disposición de residuos orgánicos y hace uso de un modelo circular en su cadena de producción. Finalmente, también cabe resaltar que aún no se cuenta con mucha investigación disponible con respecto a la temática planteada por lo que se le estaría generando valor a la academia al poder presentar nueva información y crear nuevo conocimiento.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Elaborar un prototipo de papel higiénico empleando como materia prima los residuos de césped.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar el tipo de césped que se genera como residuo en las ciudades por medio de un estado del arte.
- Demostrar los impactos positivos que generan en el medio ambiente un producto ecosostenible a base de pasto.
- Medir el rendimiento y calidad del prototipo probando los diferentes tipos de césped en cuanto al potencial en la producción de fibra y celulosa.
- Estimar el tiempo de biodegradación del producto.

## MARCO TEÓRICO

### El papel y su origen

El papel es una lámina fina producida a partir de fibras de celulosa de origen vegetal. Su fabricación se realiza mediante la suspensión en agua de la pasta de fibras vegetales, a menudo blanqueadas y a continuación secadas y endurecidas. El desarrollo del papel ha estado históricamente relacionado con el progreso de la humanidad. (Usandizaga Diseño, 2011) . El papel ha dado forma a la sociedad durante siglos y se considera uno de los inventos más importantes, los orígenes del papel se remontan a China a principios del primer milenio, alrededor del año 105 d. C. (Yilong Wang & Xiaoling Mao, 2013), se ha señalado el año 105 D.C. como la fecha de la invención del papel, que corresponde al año en que el eunuco Ts'ai Lun informó oficialmente al emperador Yüan -hsing sobre el invento. Los antiguos métodos manuales empleados en China para fabricar papel del bambú eran exageradamente tediosos comparados con los métodos modernos, sin embargo, el sistema que se implantó casi a principios de la era cristiana no ha tenido modificación alguna a través de los siglos, y aún se emplea en muy pequeña escala en el oriente (Solís, F. M. V., 2014).

El arte de la fabricación de papel luego se difundió por Asia y el norte de África y más tarde fue introducido en Europa por los árabes alrededor de 1150 dC. Más tarde, cuando Johann Gutenberg inventó la primera imprenta en 1453 dC, se adoptó el papel como medio de información. A pesar de su creciente popularidad, el uso del producto se mantuvo en una escala relativamente pequeña a nivel mundial hasta que se industrializó durante el siglo XIX. En el proceso de fabricación se utilizaban trapos, cáñamo, paja y hierba como materias primas y se golpeaban contra morteros de piedra para separar la fibra original. Aunque con el tiempo ganó terreno la mecanización, hasta el siglo XIX siguieron utilizándose los métodos de producción por lotes y las fuentes de fibra agrícolas (Mandeep, Guddu Kumar Gupta, 2020). Las primeras máquinas continuas de papel se patentaron en

los años de cambio del siglo XIX al XX. Entre 1844 y 1884 se desarrollaron los primeros métodos para la obtención de pasta de madera, una fuente de fibra más abundante que los trapos o las hierbas; estos métodos implicaban la abrasión mecánica y la aplicación de procedimientos químicos a base de sosa cáustica, sulfitos y sulfatos (Celulosa al sulfato).

En los últimos años se ha acentuado la tendencia a que las empresas fabricantes de pasta y de papel pasen a formar parte de grandes compañías integradas de productos forestales. Estas compañías controlan las operaciones de recolección forestal, las serrerías, la fabricación de pasta y de papel, y los procedimientos de clasificación. Con estos cambios se inició la era moderna de la fabricación de pasta y de papel (Teschke, K., 2001). Hoy en día, el papel es un componente importante de la vida diaria, involucrando usos tan dispares como periódicos y obras de arte, pañales, cartones, zapatos, filtros de café e incluso las pantallas de cristal líquido para televisores y monitores.

### **La industria papelera**

Los productos que surgen de la industria de la pulpa y el papel (PPI) son una necesidad importante en diferentes aspectos de la vida cotidiana, ya sea por razones sanitarias y de higiene, como billetes para posibilitar transacciones económicas, como instrumentos para difundir el conocimiento, o en forma de banners para exhibir en eventos. Más recientemente, el PPI está explorando otras rutas comerciales mediante la producción de biocombustibles de segunda generación como sustitutos de los combustibles fósiles. El PPI es diverso en cuanto al tamaño de sus empresas, abarcando desde pequeñas y medianas empresas (PYME) hasta grandes corporaciones. El comercio internacional se produce en todas las diferentes categorías de productos dentro de esta industria, incluidos los productos semielaborados y las materias primas y recicladas. El PPI también se caracteriza por sus mercados maduros, altas inversiones de capital y volatilidad de precios. Como industria establecida, la PPI produce más de 400 millones de toneladas (Mt) de papel

por año y se espera que alcance las 900 Mt para 2050, con la mayor parte del crecimiento en Asia. (Furszyfer Del Rio, et al., 2022).

La fabricación de papel representa una de las mayores producciones a nivel global. Hay fábricas en más de 100 países que otorgan empleo directo a 3,5 millones de personas. Los mayores productores son Estados Unidos, Canadá, Japón, China, Finlandia, Suecia, Alemania, Brasil y Francia. Cabe resaltar que desde 1980 la tasa anual de producción aumenta el 2,5% de forma constante.

La materia prima más utilizada es la madera procedente de los bosques de coníferas, bosques tropicales y boreales. Sin embargo, una de las mayores problemáticas actuales en la producción se desata a partir de grupos ecologistas que buscan la conservación de los recursos forestales buscando el papel reciclado como opción.

Esta materia prima se da debido a que se busca la celulosa esta es una fibra vegetal que representa el 50% de un árbol y al estar compuesta por múltiples moléculas de glucosa y unidas por lignina la cual da consistencia y rigidez a partir de la fabricación de pastas celulósicas las cuales se pueden clasificar así:

***Según la longitud de la fibra.***

- **De fibra corta:** Son maderas duras como las frondosas: eucalipto, abedul, haya, roble, chopo y su longitud está comprendida entre los 0,75 mm y los 2 mm de largo, y tienen un gran porcentaje de celulosa. Tiene un mejor acabado superficial y es ideal para la producción de papel para impresión y escritura.
- **De fibra larga:** Son maderas blandas como las coníferas: pino, abeto, pinabete. Se utiliza en la fabricación de papeles de resistencia como para las cajas de cartón y los estuches de cartulina.

- **Fibras no madereras:** Son especies de arbustos, pueden sustituir a las fibras madereras. Las especies más utilizadas son: algodón con una longitud superior a los 12 mm. Cáñamo con longitud superior a los 5 mm, lino con una longitud entre 6 y 60 mm y bagazo de cereales para producción de envases para huevos, botes y tubos de papel.
- **Fibras recuperadas:** Las fibras presentes en el papel y cartón viejo pueden volver a utilizarse para fabricar papel a través del proceso de reciclado se pueden recuperar la mayoría de las fibras de celulosa que contiene el papel.

#### *Según el proceso de obtención*

- **Mecánicas:** Producción por medio del triturando la madera contra piedra o entre placas metálicas con el fin de separar las fibras. La lignina que une la celulosa a la lignina no se disuelve lo que permite que se asienten fuera de la estructura de la madera. Esta pasta es de alto rendimiento convirtiendo en pasta más del 90% de la madera utilizada, contiene fibras cortas y debilitadas y lignina
- **Químicas:** La pasta química se produce al disolver de forma química la lignina dispuesta entre las fibras de la madera, con lo cual se separan éstas sin dañarse de forma sustancial. Como en estos procesos se eliminan muchos de los componentes no fibrosos de la madera, los rendimientos son del 40 al 55 %. El procedimiento implica la cocción de las astillas y los reactivos en solución acuosa en un reactor, llamado digestor, que puede funcionar por lotes o de forma continua.

## **Impactos en la industria papelera**

Según (Moraes, et al., 2021) la industria europea del papel y la celulosa produce anualmente once millones de toneladas de residuos, de los cuales el 70 % procede de la producción de papel reciclado destintado. Según (Santos et al., 2020) y (Chakraborty et al., 2019) Entre los sectores industriales a nivel mundial, la industria de la celulosa y el papel se puede destacar como una industria con altos impactos ambientales negativos. Esta industria se encuentra entre las industrias más contaminantes del mundo. Entre los impactos negativos generados se pueden mencionar el alto consumo de agua y madera, y la alta generación de residuos (gas, residuos sólidos y líquidos) (Gopal et al., 2019). Como resultado de este aspecto, las empresas de este sector están invirtiendo en responsabilidad social corporativa en los últimos años (Toppinen et al., 2015).

En cuanto a su magnitud, según Santi (2016), en América Latina esta industria produjo 35.918 millones de toneladas de celulosa y 21,0 millones de toneladas de papel. Según Berg y Lingqvist (2019), América Latina presenta altas oportunidades de crecimiento para los próximos años, para la mayoría de sus segmentos. Analizando específicamente algunos países de esta región, se destaca Brasil, siendo el segundo en producción de celulosa y el octavo en producción de papel a nivel mundial, solo por detrás de EE. UU. (Grötzner et al., 2018). Además de su impacto contaminante, el consumo de energía y agua de esta industria es alto (Grötzner et al., 2018; Mandeep et al., 2019).

Como lo enfatizan Andersson y Thollander (2019), la industria de la celulosa y el papel demanda un alto suministro de energía para operar. En cuanto al consumo de agua, a pesar de los avances en los procesos, todavía es necesario utilizar 60 m<sup>3</sup> de agua dulce para producir una tonelada de papel (Lindholm-Lehto et al., 2015). Para abordar los desafíos mencionados relacionados con sus operaciones, los fabricantes de pulpa y papel pueden utilizar enfoques de producción más limpia (Elnakar y Buchanan, 2019).

Esto es importante ya que en las últimas décadas se ha incrementado la conciencia de la sociedad sobre los impactos ambientales negativos que genera la industria de la

celulosa y el papel, y se está enfatizando en temas como la conservación de bosques, la deforestación y el manejo sustentable (Basso et al., 2011; Mandeep et al., 2020), especialmente cuando se considera la creciente demanda de productos de esta industria (Ofosu et al., 2020). El establecimiento de programas de certificación voluntaria de “buen manejo forestal” fue una de las estrategias implementadas para minimizar los impactos mencionados y obtener varios beneficios potenciales, incluyendo aspectos económicos, ecológicos y sociales (Basso et al., 2011; Nardelli y Griffith, 2003).

## **Pasto**

Las poáceas o gramíneas también llamadas pastos o gramas, se caracterizan por crecer en todo tipo de ambiente según las exigencias en cuanto agua, fertilidad de suelo y temperatura de cada tipo.

Su uso más frecuente es la dieta del animal, productores de materia seca por hectárea; y sus contenidos en proteína son de medianos a bajos, de acuerdo con la especie y etapa en su ciclo de crecimiento.

Existen varias clasificaciones de las gramíneas, según la forma de presentación se dividen en (León et al., 2018):

### ***Tipo de forraje***

- Forraje verde: Pasto fresco
- Forraje seco: Pajas o rastrojos de cosechas
- Forraje conservado: Sometido a algún proceso de conservación en estado fresco (ensilaje), deshidratado (heno) o mixto (henolaje).

También se pueden clasificar según el volumen en:

- Forraje voluminoso: Gran cantidad de biomasa.
- Forraje concentrado: Gran cantidad de nutrientes en poco volumen

### ***Uso al cual esté destinado***

- De pastoreo: Son aquellas especies que pueden ser tomadas directamente del suelo por los animales.
- De corte: Son las que crecen en forma de matas y necesitan ser cortadas previamente antes de suministrar al ganado.
- De doble propósito, para ganado y al ser cortadas y conservadas: Alfalfa, avena, raigrás anual.

### ***Por el ciclo evolutivo***

- Anuales: Que viven un año o menos, como los cereales forrajeros (avena, cebada, maíz, sorgo), las brassicas forrajeras (nabos, raps, coles y ruta bagas) y otras especies como la vicia y cebadilla criolla, lotus anual.
- Bianuales: Que viven dos años, como los melilotos, trébol rojo, raigrás bianual.
- Perennes (vivaces): Son las que viven más de dos años, como el raigrás, perenne, la alfalfa, trébol blanco, pasto azul, festuca, pasto elefante, guinea, etc. Los pastos perennes son el factor clave en la economía del ganadero. Si se tiene una alta y permanente producción de forraje los gastos de mantenimiento, la inversión de capital en maquinaria e implementos y los requerimientos de mano de obra por unidad de producción son menores.

### ***Por su origen:***

- Introducidas: Son las especies cultivadas es decir que, para su desarrollo y producción, necesitan del trabajo del hombre. Este debe preparar la tierra, efectuar la siembra, realizar labores culturales, etc. Ej.: la alfalfa, los raigrases.

- Naturales: Son las especies que crecen en forma espontánea en los pastizales.

En Bogotá, los residuos de las podas y mantenimiento que realiza la Alcaldía de Bogotá, en diferentes zonas de la ciudad, no se desperdician. El Jardín Botánico aprovecha el pasto, ramas y hojas que provienen de estas labores para producir cuatro toneladas de abono cada semana para sus plantas. Este es utilizado para las huertas que hacen parte del programa de agricultura urbana y las plantaciones de restauración ecológica del Jardín Botánico de Bogotá. La buena calidad de este material permite que el arbolado interior también se surta con el compostaje que fabrican. (Alcaldía de Bogotá, 2022). Se realizó en el año 2017 una caracterización en la fuente de residuos sólidos generados en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital por tipo de generador y se encontró que Bogotá presenta una tendencia en la generación de residuos sólidos orgánicos, los cuales tienen una producción per cápita PPC de 0,43 kg/Hab-día. Los residuos generados por la ciudad presentan características óptimas para iniciar proceso de aprovechamiento de la fracción orgánica, en la implementación de productos biológicos como compost, etanol y metano, casi todos los componentes orgánicos pueden ser convertidos biológicamente en gases, incluyendo sólidos e inorgánicos relativamente inertes. (Secretaría del Hábitat, 2017) .

## METODOLOGÍA

Para la producción de papel higiénico a partir del césped generado como residuo del proceso de poda en la ciudad de Bogotá, se realizó un estudio de los diferentes procesos manejados actualmente en las industrias papeleras existentes, determinando las principales etapas de fabricación, condiciones más favorables y variables relevantes que intervienen en cada una de las etapas del proceso. La investigación es cuantitativa de tipo experimental, dado que por medio de ensayos de laboratorio donde se ejecutan pruebas a manera de “ensayo y error”, se determina cual es el tratamiento más efectivo para obtener láminas de papel con las propiedades y resistencia más adecuada.

Cabe mencionar que, durante la ejecución de las pruebas experimentales, las características del papel fueron cambiando de acuerdo con la percepción que se generaba luego de realizar cada una de las pruebas empíricas. A medida que se avanzaba en la ejecución de las pruebas se identificó que el proceso de elaboración de las láminas permitía medir variables, las cuales a medida que se modificaban afectarían directamente la calidad el papel obtenido, dichas variables fueron: cantidad de materia prima utilizada, cantidad de solución aplicada para lavado, tiempo, temperatura, color, absorción y resistencia.

Teniendo en cuenta que se trata de un proceso realizado a escala laboratorio se pretende tomar como base los resultados de los ensayos realizados con el fin de escalar la fabricación a una de tipo industrial y lo cual permitiría medir más adelante variables como: pH, temperatura, resistencia y porcentaje de celulosa utilizada de un modo técnico y con instrumentos de medición de laboratorio.

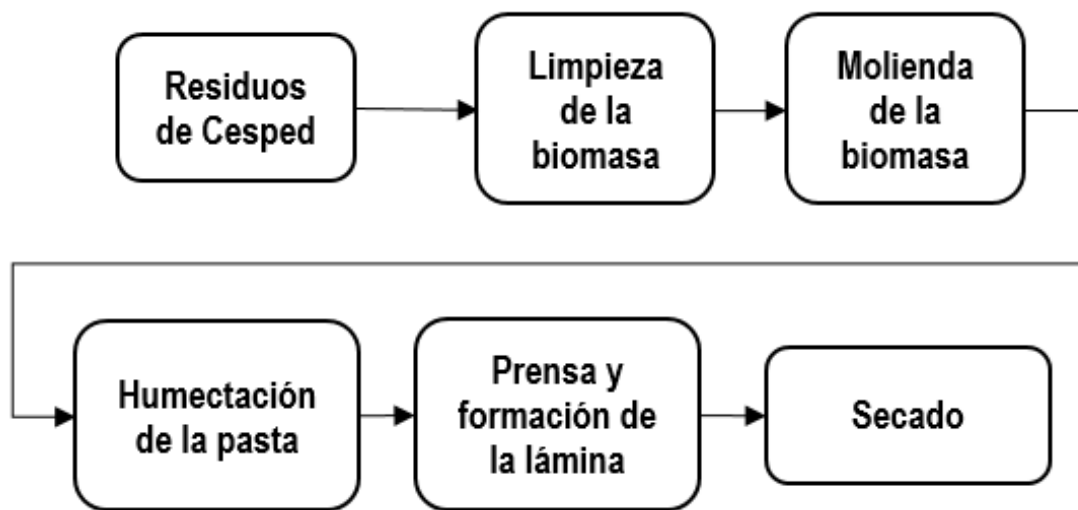
La investigación es de método deductivo, en donde se pretenden utilizar técnicas estadísticas para la generación y comparación de resultados obtenidos en los diferentes ensayos que se realicen. Para el inicio de esta investigación se realizó una revisión bibliográfica de las distintas etapas que se deben tener en cuenta para la obtención del papel que se usaron como base para plantear tres casos de prueba variando una o más variables

en cada una de ellas obteniendo cambios en las características de la lámina de papel importantes.

### Definición de variables

Teniendo en cuenta que el proceso de elaboración del prototipo se está realizando por medio de pruebas a escala laboratorio, las variables que se evalúan cambian según el tipo de lámina de papel que se vaya obteniendo y así mismo se van ajustando para buscar una mejor calidad del producto. A continuación, se muestra un gráfico que define la metodología general que se está ejecutando y con base en ella se describirán las variables que interviene en cada proceso.

**Figura 1.** Diagrama del proceso



**Fuente.** Elaboración propia

#### *Limpieza de la Biomasa*

El grado de limpieza de la biomasa será también el grado de limpieza del papel, es una variable que depende más bien de un tipo de percepción de la persona que se encarga de ejecutar el proceso ya que no hay alguna forma de medirla, es por eso la importancia de que aquí se haga una buena selección y lavado del césped a emplear.

### ***Molienda***

Es una de las variables más importantes que determina el porcentaje de fibra a obtener, ya sea larga, media o corta y por ende de ella depende la calidad del papel a obtener teniendo en cuenta esto es importante tener en cuenta la cantidad de gramaje de césped que se adicione.

### ***El gramaje de papel***

El gramaje es la masa por unidad de superficie del papel expresada en gramos por metro cuadrado. El peso o gramaje del papel puede aumentar agregando mayor cantidad de fibras en la pasta, es decir incrementado la densidad de ésta. Esta medida es importante ya que de la misma depende la regulación de la pasta de papel en la máquina, además, porque influye en el precio, debido a que el papel se puede vender por kilos o por número de hojas, por lo que la variación en su peso base, influye en el número de hojas que se pueden obtener de un kilogramo de papel. (León Nieto, 2012)

### ***Formación del papel***

Es importante que la pasta que se obtiene luego de la molienda tenga una buena consistencia y humectación, ya que esto será de gran importancia en el espesor con el que se forma la lámina.

- **Humedad Relativa:** Una de las principales características de la hoja de papel es el efecto que causa la humedad sobre las propiedades del papel. Es bien sabido que las fibras de celulosa son higroscópicas, es decir, son capaces de absorber la humedad del ambiente que las rodea. Dicha cantidad depende de la humedad relativa y la temperatura del aire en contacto con el papel, así como, de la cantidad de humedad que contenga la hoja de papel, sin embargo, la mayoría de las propiedades del papel cambia como resultado de variación en el contenido de humedad. Es por eso por lo que aquí se deberá tener en cuenta la cantidad de agua que se adiciona la pasta en mL. (León Nieto, 2012)

- **Tiempo de corte:** Se define como el tiempo que un instrumento o equipo requiere para disminuir el volumen de determinada materia prima, normalmente su unidad de medida son segundos, minutos o horas.

### ***Prensado***

Se debe de tener en cuenta que durante el prensado se presenta una variable crítica en el proceso, como lo es la presión, pues esta determina la cantidad de humedad con la que quedarán las láminas de papel, así como la cantidad de tiempo que estas tomarán para secarse. Allí también se deberá tener en cuenta que la presión debe ser aplicada de forma uniforme a toda la lámina o de lo contrario se presentarían franjas con mayor presencia de humedad en el papel lo que más adelante podría afectar sus atributos físicos.

### ***Secado***

Es indispensable tener en cuenta que se lleva a cabo a condiciones ambientales, pero para temas de optimización de dicho proceso es importante evaluar el papel que se obtiene cuando se aplica calor durante el proceso de secado. Las variables principales para esta etapa se definen a continuación:

- **Calibre del papel:** El espesor del papel es el calibre, expresado en milésimas de pulgada, de una sola hoja de papel bajo una presión de 7 a 9 psi, colocada entre dos superficies circulares y paralelas. En el sistema métrico el espesor es expresado en milímetros (mm), y la presión se encuentra entre los límites de 48 a 62 kPa. (León Nieto, 2012)
- **Resistencia al rasgado:** La resistencia al rasgado se refiere a la energía necesaria para provocar un rasgado en el papel en una longitud determinada. El método consiste en la aplicación de una carga perpendicular a las caras del papel a través de una distancia específica hasta su completa ruptura, es decir, es la energía

- necesaria en Newton o gramos fuerza para rasgar el papel en el ensayo. (León Nieto, 2012)
- **Absorción por m<sup>2</sup>** (cobb size) La prueba de absorción por m<sup>2</sup> se realiza en el equipo Cobb Size originalmente, pero para nuestra investigación se aplicará el mismo principio, pero debido a que no se cuenta con el equipo necesario se harán modificaciones para ejecutar una prueba un poco más empírica. Se corta un cuadro de papel de 13 x 13 cm, se pesa y se ubica sobre un recipiente, luego se agregan 100 ml de agua y se deja por 2 minutos. A continuación, se vacía el agua y se quita el exceso que haya quedado en el papel, luego se pesa una vez más el papel y se expresa el resultado en gramos de agua absorbidos por m<sup>2</sup> de papel. (León Nieto, 2012)
  - **Tiempo de secado:** es el tiempo necesario para que la lámina de papel se encuentre totalmente libre de humedad y será medida en segundos, minutos o horas.

Con el fin de establecer de forma más precisa las variables que serán tenidas en cuenta en el diseño experimental, se presenta la siguiente tabla.

**Tabla 1.** *Operacionalización de variables*

Variable	Tipo de variable	Unidad de medida
Gramaje de papel	Constante	g o Kg
Humedad	Constante	mL o L
Tiempo de corte	Constante	s, min o h
Calibre del papel	Dependiente	mm
Resistencia al rasgado	Dependiente	kg/mm <sup>2</sup>

Absorción por m <sup>2</sup>	Dependiente	mL(Absorbidos H <sub>2</sub> O) /m <sup>2</sup>
Tiempo de secado	Dependiente	s, min o h

**Fuente.** Elaboración propia

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se diseñan los siguientes métodos para la obtención de las láminas de papel.

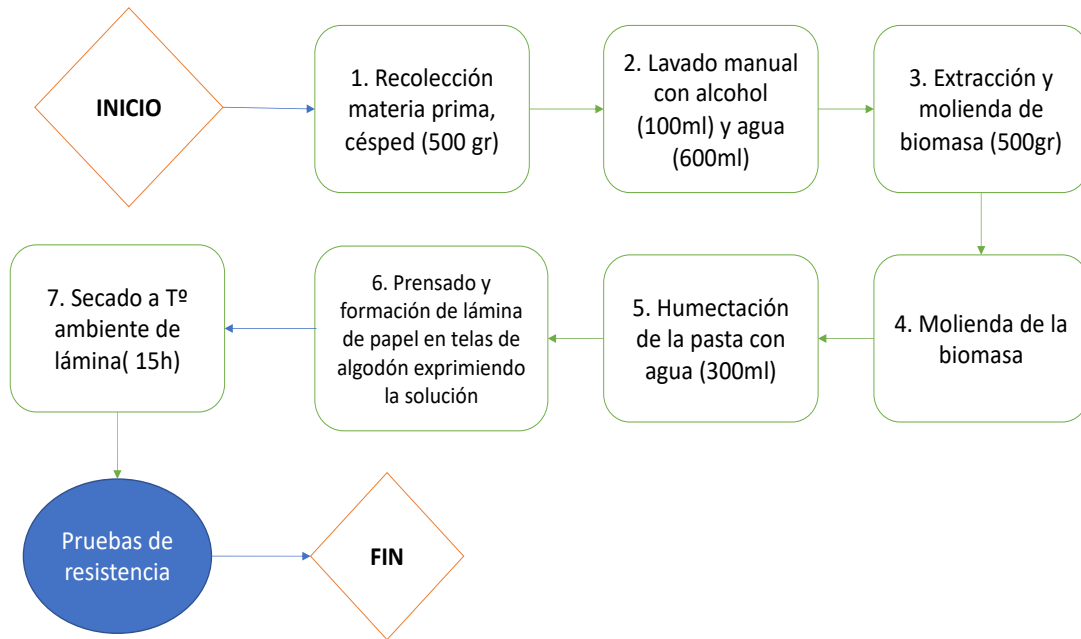
### **Diseño experimental**

Para el diseño experimental del proceso se tomó una muestra del césped que resulta después del proceso de poda en la ciudad de Bogotá para ser usado como materia prima principal, se procede con el lavado de la biomasa, molienda, humectación de la pasta, proceso de prensado, formación de la lámina y por último el secado de la lámina. En el diseño experimental inicial se plantean 3 casos de ensayo en los cuales se pueden identificar las siguientes variables de prueba: Cantidad de materia prima utilizada, Cantidad de solución aplicada para lavado, Temperatura, Tiempo de secado, Color, Absorción y Resistencia, de las cuales unas se toman como fijas y otras se cambian con el fin de obtener diferentes resultados para ser comparados con las características deseadas.

A continuación, se describen los 3 casos de ensayo planteados inicialmente en cada una de las etapas:

#### ***Primer caso de ensayo***

**Figura 2.** Primer diseño de experimental

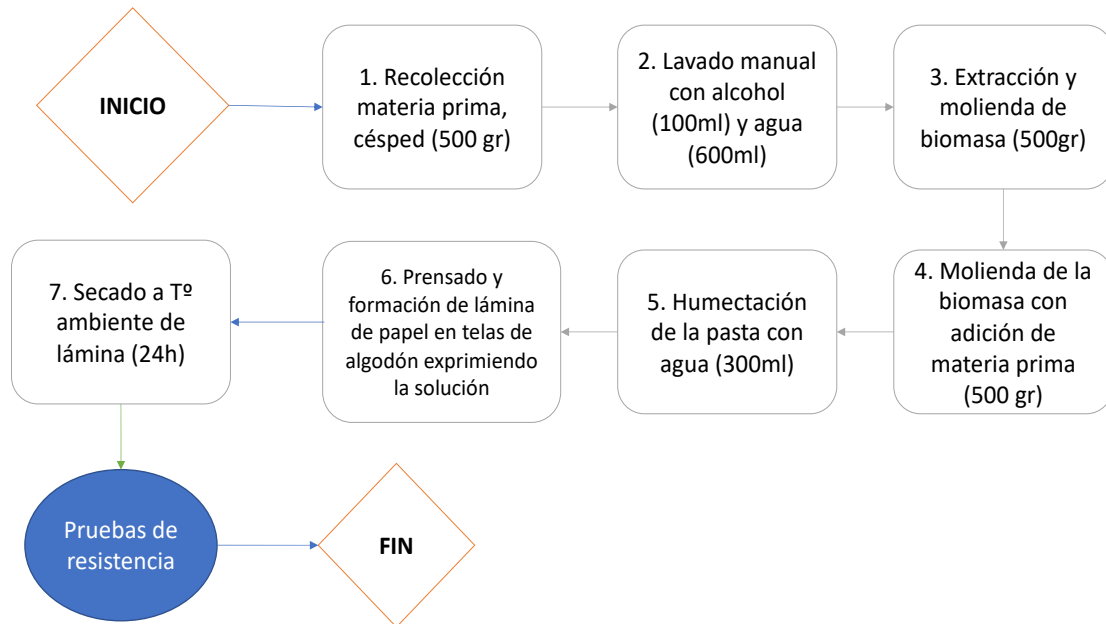


**Fuente.** Elaboración propia

Como primer paso se recolecta el césped, se lava el pasto manualmente con 500 a 700 ml de agua junto con 100 ml de alcohol con el fin de limpiar el pasto de las impurezas del medio ambiente, después de la limpieza se procede a utilizar aproximadamente 400 a 600 gramos de pasto para licuarlos y poder extraer la materia prima, se procede a utilizar un colador para separar el agua del pasto, se vierte el agua utilizada en un tazón, seguido a esto se incorpora la materia prima junto con el agua (300ml). Para el proceso de colación se añade la materia prima en un colador rectangular y se dispersa suavemente cubriendo la superficie del colador. Luego se sitúa el producto obtenido en telas de algodón para aprisionar y reducir el agua que tiene actualmente la materia prima, se utiliza una esponja para absorber el agua residual. Para el proceso de secado se deja a temperatura ambiente durante 12- 18 horas para obtener el producto Final.

## Segundo caso de ensayo

Figura 3. Segundo diseño de experimental



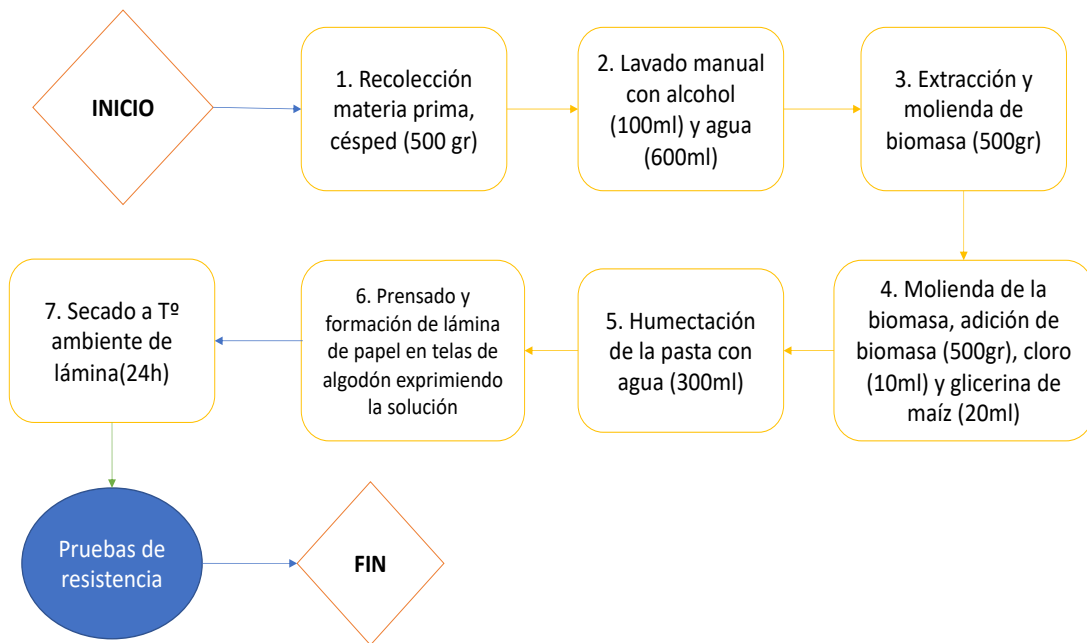
Fuente. Elaboración propia

Como primer paso se recolecta el césped, se lava el pasto manualmente con 500 a 700 ml de agua junto con 100 ml de alcohol con el fin de limpiar el pasto de las impurezas del medio ambiente, después de la limpieza se procede a utilizar aproximadamente 400 a 600 gramos de pasto para licuarlos y poder extraer la materia prima, se añaden 500gr más de materia prima a la mezcla para adquirir un producto más sólido, se procede a utilizar un colador para separar el agua del pasto, se vierte el agua utilizada en un tazón, seguido a esto se incorpora la materia prima junto con el agua (300ml). Para el proceso de colación se añade la materia prima en un colador rectangular y se dispersa suavemente cubriendo la superficie del colador. Luego se sitúa el producto obtenido en telas de algodón para aprisionar y reducir el agua que tiene actualmente la materia prima, se utiliza una esponja para absorber el agua residual. Para el proceso de secado se deja a temperatura ambiente

durante 24 horas para obtener el producto final. Este proceso conllevó más tiempo porque se aumentó el gramaje de las materias primas en el momento de la colación.

### *Tercer caso de ensayo*

**Figura 4.** Tercer diseño de experimental



**Fuente.** Elaboración propia

Como primer paso se recolecta el césped, se lava el pasto manualmente con 500 a 700 ml de agua junto con 100 ml de alcohol con el fin de limpiar el pasto de las impurezas del medio ambiente, después de la limpieza se procede a utilizar aproximadamente 400 a 600 gramos de pasto para licuarlos y poder extraer la materia prima, se añaden 500gr más de materia prima a la mezcla para adquirir un producto más sólido, 10ml de cloro y 20ml de glicerina de maíz con el fin de obtener un producto más sólido y claro. Se procede a utilizar un colador para separar el agua del pasto, se vierte el agua utilizada en un tazón, seguido a esto se incorpora la materia prima junto con el agua (300ml).

Para el proceso de colación se añade la materia prima en un colador rectangular y se dispersa suavemente cubriendo la superficie del colador. Luego se sitúa el producto obtenido en telas de algodón para aprisionar y reducir el agua que tiene actualmente la materia prima, se utiliza una esponja para absorber el agua residual. Para el proceso de secado se deja a temperatura ambiente durante 24 horas para obtener el producto final. Este proceso conllevó más tiempo porque se aumentó el gramaje de las materias primas en el momento de la colación.

## **TÉCNICA DE ANÁLISIS DE DATOS**

Teniendo en cuenta los distintos modelos previamente presentados, que hacen referencia a ensayos basados en una metodología experimental, se optará por realizar un análisis estadístico de inferencia. En este análisis, se utilizarán técnicas de correlación para determinar la relación entre las variables planteadas. Mediante estas técnicas, se buscará cuantificar la fuerza y la dirección de la asociación entre las variables, brindando así una comprensión más profunda de las interacciones existentes. El análisis estadístico de inferencia permitirá obtener conclusiones significativas y respaldadas por evidencia empírica, contribuyendo a la validación y a la fundamentación de los resultados obtenidos en este estudio.

La correlación se basa en el coeficiente de correlación, el cual es un valor numérico que varía entre -1 y 1. El coeficiente de correlación de Pearson es el más comúnmente utilizado y se aplica cuando las variables están en una escala de intervalo o razón. Un coeficiente de correlación de +1 indica una correlación positiva perfecta, lo que significa que las variables se mueven en la misma dirección de manera proporcional. Un coeficiente de correlación de -1 indica una relación negativa perfecta, lo que significa que las variables se mueven en direcciones opuestas de manera proporcional. Un coeficiente de correlación 0 indica la ausencia de correlación lineal entre las variables.

### ***Distribución Beta***

Según (González et al., 2014) en la teoría de probabilidad y estadística, la distribución beta representa una familia de distribuciones de probabilidad continuas con soporte en el intervalo (0,1). La densidad beta es caracterizada por dos parámetros positivos, indicados generalmente por  $\alpha$  y  $\beta$  o  $u$  y  $v$ , que son parámetros de localización y de escala. La distribución beta ha sido aplicada para modelar el comportamiento de variables aleatorias limitadas a intervalos de amplitud finita, en una gran variedad de áreas. Su densidad es:

$$f(x) = \frac{\Gamma(u + v)}{\Gamma(u)\Gamma(v)} (x)^{u-1}(1 - x)^{v-1}; x \in (0,1)$$

que puede tener variados comportamientos, dependiendo de los valores de los parámetros, desde comportamientos simétricos hasta totalmente asimétricos. Este modelo de distribución considera información adicional de las características de los datos, como es la pertenencia a un soporte acotado, sin los problemas de sobrestimación de elementos improbables en la práctica.

Según (Oracle, 2023) la distribución beta es continua. Se utiliza normalmente para representar variabilidad en un rango fijo. Puede representar incertidumbre en la probabilidad de que se produzca un evento. Se utiliza también para describir datos empíricos y predecir el comportamiento aleatorio de porcentajes y fracciones y se puede utilizar para representar la fiabilidad de los dispositivos de una empresa.

- **Parámetros:**

Mínimo, Máximo, Alfa, Beta

- **Condicionales:**

La distribución beta se utiliza cuando se dan las siguientes condiciones: El rango mínimo y máximo debe estar comprendido entre 0 y un valor positivo.

La forma se puede especificar con dos valores positivos, alfa y beta. Si los parámetros son iguales, la distribución es simétrica. Si alguno de los parámetros es 1 y el

otro parámetro es mayor que 1, la distribución tiene forma de J. Si alfa es menor que beta, se dice que la distribución está sesgada positivamente (la mayoría de los valores se aproximan al valor mínimo). Si alfa es superior a beta, la distribución está sesgada negativamente (la mayoría de los valores se aproximan al valor máximo). Dado que la distribución beta es compleja, los métodos para determinar los parámetros de distribución van más allá del alcance de este manual. Para obtener más información acerca de la distribución beta y estadísticas bayesianas, consulte los textos en la bibliografía.

### ***Método Pert***

Según (Zabala, 2021) P.E.R.T. es el acrónimo de ***Program Evaluation and Review Technique***, Técnica de evaluación y revisión de programas. Se utiliza para estimar la duración o el coste de una actividad o proyecto. PERT se calcula, utilizando un promedio ponderado de tres estimaciones diferentes:

- Estimación más probable (M): estimación basada en una evaluación realista para completar el trabajo y los costes previstos.
- Optimista (O): la estimación se determina mediante un análisis del mejor escenario para la actividad, considerando todas las condiciones favorables.
- Pesimista (P): la estimación se basa en un análisis del peor escenario para la actividad.

La Duración media (esperada) de una actividad, se calcula mediante la fórmula:  $PERT = (O + (4x M) + P) / 6$ .

La Desviación estándar de una actividad (su variación respecto a la media), se calcula mediante la fórmula:  $SD = (P - O) / 6$ .

Suponiendo que la media se sitúa en el punto central, y que las estimaciones seguirán una distribución normal, dentro del rango entre estimaciones optimistas y pesimistas, podemos predecir las probabilidades de completar una tarea en un rango de tiempo, como se muestra a continuación:

La media  $\pm 1$  x rango de desviación estándar: probabilidad del 68,3%

Media  $\pm 2$  x rango de desviación estándar: probabilidad del 95,4%

Media  $\pm 3$  x rango de desviación estándar: probabilidad del 99,7%

Aunque este método es más utilizado para estimar las actividades de un proyecto, puede ser muy útil para los ensayos realizados en este proyecto para estimar la variable en cada etapa del proceso. Ej. El cálculo de la variable tiempo en el proceso de secado de la lámina de papel. Cabe aclarar que se pretenden utilizar estos ensayos como base para luego incorporarlos a un proceso industrial, donde además de evaluar las variables que se mencionan en el apartado anterior también se incorporen otras como: pH, temperatura, estabilidad del papel, porcentaje de celulosa utilizada, durabilidad. Y con estos datos poder utilizar un Software que permita analizar la dependencia de la variable de respuesta como STATGRAPHICS CENTURIÓN que, según la Universidad de Burgos en 2022, es una herramienta de análisis de datos de gran alcance la cual combina una amplia gama de procedimientos con brillantes gráficos interactivos para proporcionar un entorno integrado de análisis de datos. Está diseñado con funciones avanzadas de estadística, lo suficientemente significativas para ser usado por expertos y que, mediante una interfaz intuitiva proporcione la simplicidad suficiente para que un analista novel pueda realizar procedimientos complejos.

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta cada uno de los diseños experimentales que se establecieron en la metodología, se realizaron los respectivos ensayos en donde se evaluaron los cambios que se obtenían en las láminas de papel cuando se realizaba las modificaciones en algunas de las variables establecidas en cada una de las etapas, a continuación, se muestran los principales resultados obtenidos en cada uno de los experimentos.

### **Primer caso de ensayo**

Para el primer caso de ensayo durante el proceso de molienda no se adiciona más materia prima al proceso y el tiempo de secado fue solo de 15 horas. Por lo tanto, las variables que más importantes que intervinieron en el proceso fue los gramos de biomasa adicionada y el tiempo de secado. Cabe mencionar que una vez se obtuvo la lámina de papel, se procedió a realizar pruebas de resistencia y absorción de modo empírico en los cuales se obtienen los siguientes resultados:

- El producto cuenta con poca resistencia al doblar, al escribir y en la absorción.
- El producto se rasga al escribir.
- El producto no resiste más de un doblez.
- El producto no cuenta con absorción.

**Figura 5.** Lámina obtenida del primer ensayo



**Fuente.** Elaboración propia

### **Segundo caso de ensayo**

Durante el segundo ensayo se modificó la cantidad de materia prima añadida al proceso, pues allí durante el proceso de molienda se incorpora más biomasa, de igual forma el tiempo de secado de la lámina se incrementó en 7 horas. Para este experimento se obtuvieron los siguientes resultados:

- El producto cuenta con buena resistencia al doblar, resistencia al escribir y resistencia de absorción.
- El producto no se rasga al escribir, pero no se debe ejercer mucha fuerza en el proceso.
- El producto resiste más de cuatro dobleces sin ningún daño.
- El producto cuenta con absorción, pero no con resistencia al momento de jalar la parte húmeda suavemente.

**Figura 6.** Lámina obtenida del segundo ensayo



**Fuente.** Elaboración propia

### **Tercer caso de ensayo**

Para el tercer caso experimental, durante el proceso de molienda aparte de añadirse más cantidad de biomasa al proceso, se incorpora cloro y glicerina con el fin de mejorar el color de la lámina, así como su consistencia. Por otra parte, durante este ensayo continua constante el tiempo de secado. Una vez la lámina de papel se encontraba totalmente seca se procedió a realizar las pruebas de resistencias y absorción de forma empírica, los resultados fueron los siguientes:

- El producto cuenta con buena resistencia al doblar, resistencia al escribir y resistencia de absorción.

- El producto no se rasga al escribir, pero no se debe ejercer mucha fuerza en el proceso.
- El producto resiste más de cuatro dobleces sin ningún daño.
- El producto cuenta con absorción, pero no con resistencia al momento de jalar la parte húmeda suavemente.

**Figura 7.** Lámina obtenida del tercer ensayo

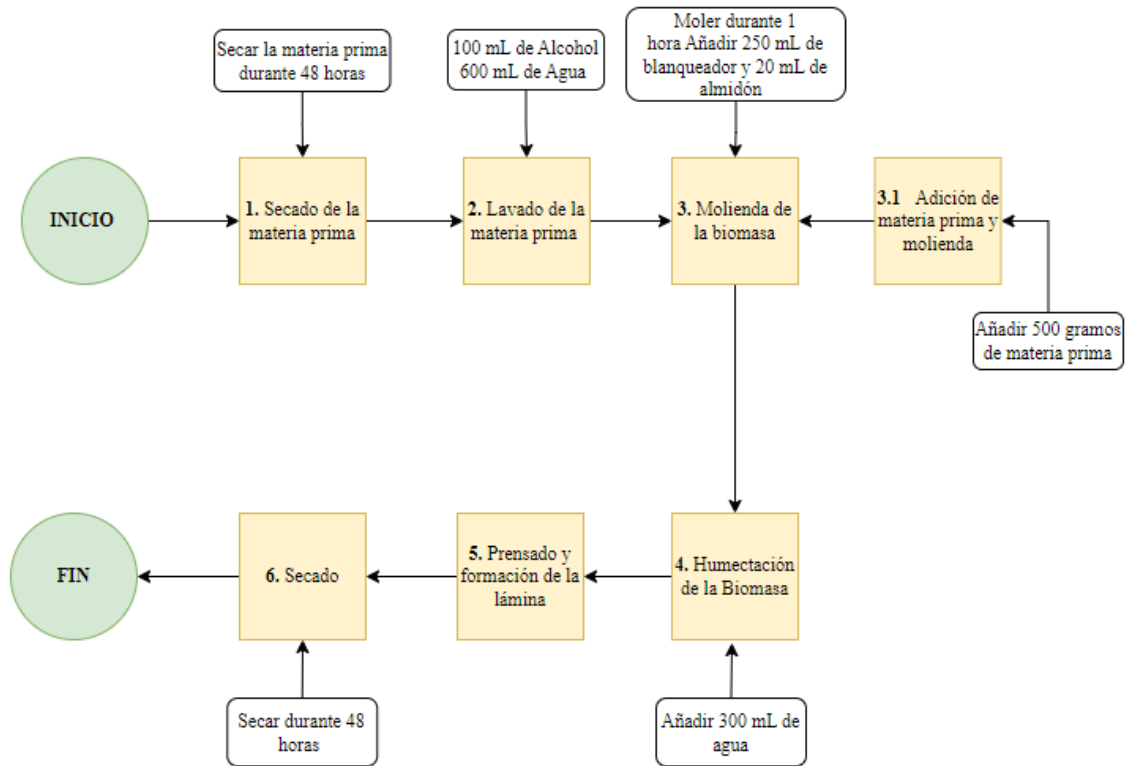


**Fuente.** Elaboración propia

Luego de los distintos ensayos que se realizaron para la obtención de las láminas de papel y de acuerdo con los resultados obtenidos se establece que el diagrama de proceso que

mejor representa el caso de éxito y las variables involucradas es el siguiente. Es necesario hacer mención que las variables allí mencionadas están determinadas para 500 gramos de materia prima.

**Figura 8.** Diseño del proceso de producción de papel a partir de césped



**Fuente.** Elaboración propia

Como se evidencia desde el momento en que se realizar la recolección de la materia prima hasta el proceso de secado intervienen diferentes variables que afectan considerablemente las diferentes características y propiedades del papel por ende dichas variables deben ser medidas con la finalidad de controlar cada etapa del proceso.

Al tener establecido cual es el proceso de obtención de papel que resulta más viable para el proceso, se ejecutó el experimento teniendo en cuenta las variables más indispensables para cada una de las etapas, las variables seleccionadas fueron las que se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 2. Principales variables durante las etapas de fabricación del papel

Operación	Variable
Secado de la materia prima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de secado</li> <li>- Temperatura de secado</li> </ul>
Lavado de la materia prima	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Solventes empleados para el lavado (Alcohol)</li> </ul>
Molienda de la biomasa	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de molienda</li> <li>- Maquina empleada para la molienda</li> <li>- Cantidad de blanqueador</li> <li>- Cantidad de almidón</li> <li>- Cantidad de materia prima</li> </ul>
Humectación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cantidad de agua</li> </ul>
Prensado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo de telas empleadas</li> <li>- Tipo de malla empleada</li> </ul>
Secado de lamina	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo de secado</li> <li>- Temperatura de secado</li> </ul>

**Fuente.** Elaboración propia

De acuerdo a las variables establecidas y el diagrama presentado anteriormente, a continuación, se describe de forma detallada el proceso de obtención final.

Como primer paso se recolecta el césped, se lava el pasto manualmente con 500 a 700 ml de agua junto con 100 ml de alcohol con el fin de limpiar el pasto de las impurezas del medio ambiente, después de la limpieza se procede a utilizar aproximadamente 400 a 600 gramos de pasto para licuarlos por 1 hora y poder extraer la materia prima, se añaden 500gr más de materia prima a la mezcla para adquirir un producto más sólido, 250ml de blanqueador con limón para blanquear la fibra y 20ml de glicerina de maíz con el fin de obtener un producto más sólido y claro. Se procede a utilizar un colador para separar el

agua del pasto, se vierte el agua utilizada en un tazón, seguido a esto se incorpora la materia prima junto con el agua (300ml).

Para el proceso de colación se añade la materia prima en un colador rectangular y se dispersa suavemente cubriendo la superficie del colador. Luego se sitúa el producto obtenido en telas de algodón para aprisionar y reducir el agua que tiene actualmente la materia prima, se utiliza una esponja para absorber el agua residual. Para el proceso de secado se deja a temperatura ambiente durante 24 horas para obtener el producto final. Este proceso conllevó más tiempo porque se aumentó el gramaje de las materias primas en el momento de la colación. En este último ensayo se realizó el proceso por capas en vez de una sola como se había hecho en los ensayos anteriores.

Una vez el producto final es obtenido, se procede a realizar pruebas de resistencia y absorción de modo empírico en los cuales se obtienen los siguientes resultados:

- El producto a diferencia de las anteriores pruebas, no genera grumos con el roce.
- El producto cuenta con buena resistencia al doblar, resistencia al escribir y resistencia al agua sin desintegrarse.
- El producto no se rasga al escribir.
- El producto resiste más de cuatro dobleces sin ningún daño.
- El producto presenta una resistencia igual en comparación con el papel higiénico convencional. Se ha observado que este prototipo no tiende a romperse fácilmente al doblar sus partes o cuando se aplica una fuerza considerable.

Durante todo el proceso, desde la recolección de la materia prima hasta el secado, se evidencia la influencia de diversas variables que impactan significativamente en las características y propiedades del papel higiénico. Es esencial medir y controlar estas variables en cada etapa del proceso para garantizar la calidad del producto final. El monitoreo cuidadoso de estas variables permitirá optimizar y ajustar los parámetros de

producción, asegurando que se cumplan los estándares deseados y se obtenga un papel higiénico funcional y de calidad.

Figura 9. Lámina obtenida del cuarto ensayo



**Fuente.** Elaboración propia

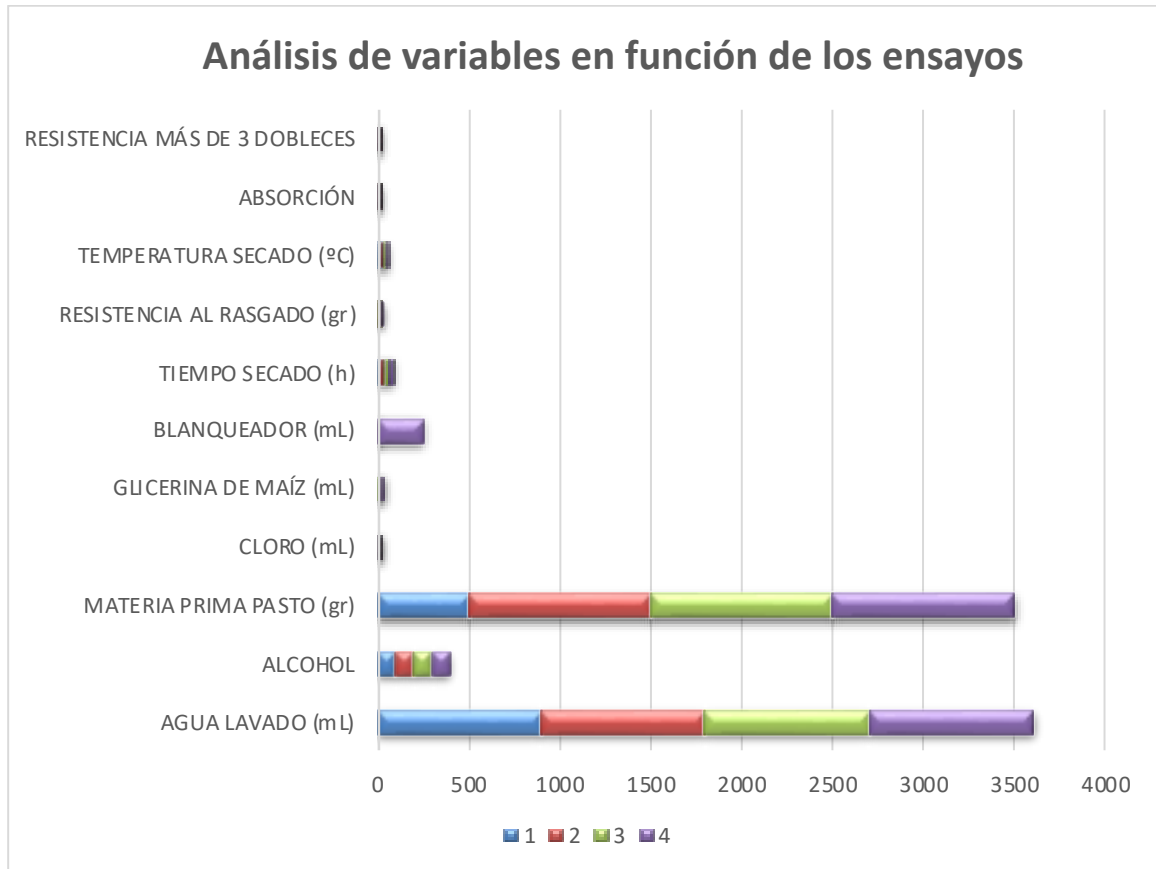
**Figura 10.** Lámina final obtenida del cuarto ensayo



**Fuente.** Elaboración propia

La siguiente gráfica muestra la relación entre diferentes variables y los ensayos realizados. Los datos recopilados proporcionan información sobre el agua lavado, el alcohol, la materia prima de pasto, el cloro, la glicerina de maíz, el blanqueador, el tiempo de secado, la resistencia al rasgado, la temperatura de secado, la absorción y la resistencia a más de 3 dobleces. Al examinar las tendencias y patrones en la gráfica, podremos obtener una visión más clara de cómo estas variables se relacionan con los ensayos y comprender su impacto en el proceso de producción de papel higiénico a partir de residuos de césped cortado.

**Figura 11.** Análisis de variables en función de los ensayos



**Fuente.** Elaboración propia

El análisis de los resultados revela que los ensayos realizados en las cuatro muestras numeradas del 1 al 4 demostraron mejoras significativas a medida que se introducían diferentes componentes o se incrementaba la cantidad de ciertos productos. Se mantuvo una cantidad constante de 900 mL de agua de lavado y 100 mL de alcohol en todos los ensayos. La variación en la materia prima de pasto, con 500 g en el ensayo 1 y 1000 g en los ensayos 2, 3 y 4, tuvo un impacto notable en el tiempo de secado y la absorción de las láminas resultantes. La adición de 10 mL de cloro en los ensayos 3 y 4, junto con 20 mL de glicerina de maíz en los mismos ensayos, contribuyó a obtener un papel más resistente y sólido, obteniendo resultados exitosos.

Además, se aplicaron 250 mL de blanqueador exclusivamente en el ensayo 4, mejorando la apariencia física del producto final en términos de olor y color. El tiempo de secado varió en cada ensayo, siendo de 16 horas en el ensayo 1, 24 horas en los ensayos 2 y 3, y 26 horas en el ensayo 4. La resistencia al rasgado mostró un aumento gradual a medida que se incrementaba el número de ensayo, con valores de 3 gramos, 5 gramos, 9 gramos y 15 gramos en los ensayos 1, 2, 3 y 4, respectivamente. La temperatura de secado se mantuvo constante en 16°C en todos los ensayos. Además, tanto la absorción como la resistencia a más de 3 dobleces experimentaron un aumento a partir del ensayo 2, con valores de 1 en los ensayos 2, 3 y 4 para ambas variables. Estos resultados resaltan la influencia positiva de las variables estudiadas en las características y propiedades del papel higiénico producido a partir de residuos de césped cortado.

#### Correlación de variables Pearson

Utilizando el análisis de correlación de variables se busca determinar si existe una asociación lineal entre las variables y evaluar la fuerza y la dirección de esta relación. El análisis de correlación proporciona información valiosa sobre cómo las variables se relacionan entre sí, lo cual puede ser útil para comprender patrones, predecir resultados y tomar decisiones informadas. Para esto, se utilizó la siguiente fórmula:

$$r = [\Sigma((X - \bar{X}) * (Y - \bar{Y}))] / [\sqrt{\Sigma(X - \bar{X})^2} * \sqrt{\Sigma(Y - \bar{Y})^2}] \quad (1)$$

Donde:

r: es el coeficiente de correlación de Pearson.

X y Y: son los valores de las dos variables que se están correlacionando.

$\bar{X}$  y  $\bar{Y}$ : son las medias de los valores de X e Y, respectivamente.

$\Sigma$ : indica la suma de los valores en toda la muestra.

El coeficiente de correlación de Pearson proporciona un valor numérico que varía entre -1 y 1. Un valor de +1 indica una correlación positiva perfecta, un valor de -1 indica una correlación negativa perfecta, y un valor de 0 indica la ausencia de correlación lineal.

Se realizó la correlación entre las siguientes variables:

- **Materia prima y Absorción**

r: es el coeficiente de correlación de Pearson.

X: son los valores de la materia prima en gramos (500, 1000, 1000, 1000).

Y: son los valores de la absorción (0, 1, 1, 1).

$\bar{X}$ : es la media de los valores de la materia prima en gramos.

$\bar{Y}$ : es la media de los valores de la absorción.

Para realizar el cálculo, primero necesitamos obtener las medias de X y Y:

$$\bar{X} = (500 + 1000 + 1000 + 1000) / 4 = 875 \text{ gramos}$$

$$\bar{Y} = (0 + 1 + 1 + 1) / 4 = 0.75$$

Luego, calculamos la suma de los productos de las desviaciones de X y Y:

$$\begin{aligned}\Sigma((X - \bar{X}) * (Y - \bar{Y})) &= ((500 - 875) * (0 - 0.75)) + ((1000 - 875) * (1 - 0.75)) + ((1000 - 875) * (1 - 0.75)) + ((1000 - 875) * (1 - 0.75)) \\ &= (-375 * -0.75) + (125 * 0.25) + (125 * 0.25) + (125 * 0.25) \\ &= 281.25\end{aligned}$$

Calculamos las sumas de las desviaciones al cuadrado:

$$\begin{aligned}\Sigma(X - \bar{X})^2 &= ((500 - 875)^2 + (1000 - 875)^2 + (1000 - 875)^2 + (1000 - 875)^2) \\ &= (-375)^2 + 125^2 + 125^2 + 125^2 \\ &= 140625\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma(Y - \bar{Y})^2 &= ((0 - 0.75)^2 + (1 - 0.75)^2 + (1 - 0.75)^2 + (1 - 0.75)^2) \\ &= (-0.75)^2 + 0.25^2 + 0.25^2 + 0.25^2 \\ &= 0.5625\end{aligned}$$

Finalmente, sustituimos los valores en la fórmula:

$$\begin{aligned}r &= (281.25) / [\sqrt{(140625)} * \sqrt{(0.5625)}] \\ &= 0.657\end{aligned}$$

Por lo tanto, el coeficiente de correlación de Pearson entre la materia prima en gramos y la absorción es de aproximadamente 0.657. Esto indica una correlación positiva moderada entre estas dos variables.

Se realizó lo mismo con las variables de Tiempo de Secado y Resistencia al rasgado y los resultados fueron los siguientes:

r: es el coeficiente de correlación de Pearson.

X: son los valores de la resistencia al rasgado en gramos (3, 5, 9, 15).

Y: son los valores del tiempo de secado en horas (16, 24, 24, 26).

$\bar{X}$ : es la media de los valores de la resistencia al rasgado.

$\bar{Y}$ : es la media de los valores del tiempo de secado.

$$\begin{aligned}\Sigma(X - \bar{X})^2 &= ((3 - 8)^2 + (5 - 8)^2 + (9 - 8)^2 + (15 - 8)^2) \\ &= (-5)^2 + (-3)^2 + 1^2 + 7^2 \\ &= 114\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma(Y - \bar{Y})^2 &= ((16 - 22)^2 + (24 - 22)^2 + (24 - 22)^2 + (26 - 22)^2) \\ &= (-6)^2 + 2^2 + 2^2 + 4^2 \\ &= 56\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}r &= \frac{54}{[\sqrt{114}] * \sqrt{56}} \\ &\approx \mathbf{0.422}\end{aligned}$$

Por lo tanto, el coeficiente de correlación de Pearson entre la resistencia al rasgado y el tiempo de secado es aproximadamente 0.422. Esto indica una correlación positiva moderada entre estas dos variables. A medida que el tiempo de secado aumenta, la resistencia al rasgado tiende a aumentar también.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En primer lugar, se observa una clara relación entre la cantidad de materia prima de pasto utilizada y las propiedades del papel higiénico resultante. A medida que se aumentaba la cantidad de pasto, se observaron mejoras en la resistencia al rasgado, la absorción y la resistencia a más de 3 dobleces. Esto sugiere que el aumento en la cantidad de materia prima contribuye positivamente a la calidad y durabilidad del producto final.

Además, se evidencia la influencia de los aditivos utilizados, como el cloro, la glicerina de maíz y el blanqueador. Estos componentes adicionales mostraron contribuciones significativas en términos de la resistencia al rasgado, la apariencia física y otras propiedades del papel higiénico. Los resultados respaldan la hipótesis de que la adición de aditivos puede mejorar ciertas características del producto y brindar beneficios adicionales.

Por último, el tiempo de secado también demostró ser un factor determinante en las propiedades del papel. Se observó que un mayor tiempo de secado se asoció con una mayor resistencia al rasgado, lo cual indica que un adecuado proceso de secado contribuye a fortalecer las fibras del papel y mejorar su calidad.

En resumen, los resultados destacan la importancia de controlar y ajustar las variables en el proceso de producción del papel higiénico a base de residuos de césped cortado. Estos hallazgos respaldan la idea de que es posible desarrollar una alternativa sostenible y funcional del producto, minimizando el impacto negativo en el medio ambiente. Sin embargo, es necesario realizar más investigaciones y pruebas para optimizar aún más las

propiedades del papel y explorar otras variables relevantes que puedan influir en su rendimiento y características.

Es importante aclarar que se busca la optimización de las herramientas y productos utilizados, así como la búsqueda de soluciones más sostenibles mejorando la elección de los aditivos utilizados para el blanqueamiento por otros que tengan menor impacto negativo al medio ambiente para así alinear los objetivos propuestos con el resultado final obtenido. De esta manera, se espera ofrecer al mercado un papel higiénico elaborado a partir de residuos de césped cortado que cumpla con altos estándares de calidad y contribuya a la preservación del medio ambiente y, se espera aportar a la academia con esta investigación realizada, inspirando el desarrollo de nuevos productos utilizando residuos de procesos anteriores como materia prima y aportando de gran manera a la sostenibilidad.

## CONCLUSIONES

- Luego de realizar los experimentos fue posible determinar la mejor ruta para elaborar un prototipo de papel higiénico a partir de los residuos de césped cortado.
- En la ciudad de Bogotá, los residuos que se generan como la poda de las zonas verdes no son aprovechadas y terminan disponiéndose en rellenos sanitarios, lo que permite contemplar la idea de que se pueda crear un emprendimiento que se dedique a la fabricación de papel higiénico a partir de los residuos de césped.
- No fue posible estimar el tiempo de biodegradación del prototipo obtenido debido a que el proyecto se encontraba en su etapa preliminar en la cual se debía diseñar la ruta de fabricación del producto.
- Dentro de las variables que intervienen en el proceso de obtención del papel, las cuales fueron expuestas en el desarrollo de este proyecto se determinó que las más indispensables son la cantidad de materia prima empleada, el tiempo de molienda, la cantidad de agua usada en el proceso de humectación y el tiempo de secado, pues se determinó que en la medida que es estas presenten variaciones se afecta en gran medida la calidad del papel obtenido.
- Cuando se añade algún tipo de agente químico durante la etapa de molienda se evidencia una mejora en el aspecto físico como el color de la lámina del papel y eso debido a la naturaleza de la materia prima empleada.
- Cuando se emplea almidón durante la producción de las láminas de papel se evidencia una mejora en las propiedades físicas del papel como su resistencia y capacidad de absorción de humedad.

- La resistencia a la tensión resulta ser una de las propiedades más importantes en el papel, por lo tanto, se demostró mediante el experimento uno que al diseñar un proceso de obtención de papel que involucre baja cantidades de materia prima, se obtendrán laminas con unas propiedades físicas muy pobres en cuanto a la suavidad, la tensión y su capacidad para retener humedad.
- Teniendo en cuenta que no se realizó una segregación del césped empleado en el diseño del prototipo se puede determinar que la biomasa empleada es una potencial fuente de celulosa.
- El secado de las diferentes láminas se realizó a condiciones ambientales, lo que provoca que esta etapa requiera de la inversión de un tiempo considerable por lo que se hace necesario evaluar alternativas para dicho proceso si se requiere una optimización de la operación.
- Es necesario evaluar la posibilidad de incluir en el proceso de fabricación del papel algún tipo de materia prima que ayude a aumentar el porcentaje de alargamiento de las fibras y con esto aumentar la resistencia a la tracción del papel obtenido.

## REFERENCIAS

- Paul, S. K., & Chowdhury, P. (2020). A production recovery plan in manufacturing supply chains for a high-demand item during COVID-19. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 51(2), 104–125. <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-04-2020-0127>
- De la Torre Hasing, K. (2015). (tech.). *Estudio del comportamiento del consumidor de papel higiénico en el mercado bogotano*. Bogotá, D.C.: Proyecto de Grado para optar el título de Magíster en Administración.
- Leon Nieto, C. M. (2012). *Diseño de un proceso para la fabricación de papel reciclado ecológico a escala laboratorio usando peróxido de hidrógeno* (thesis). Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de ingeniero químico, Cartagena de Indias D.T. Y C.
- Bocanegra Linares, F. L. (2019). *Evaluación del impacto ambiental del aprovechamiento del residuo del corte de césped en la ciudad de Bogotá mediante la elaboración de alcohol carburante utilizando el análisis de ciclo de vida* (thesis). Propuesta de Trabajo de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería, Bogotá.
- ANDI. (2018, December 6). Sector papelerero en Colombia crece y se destaca por su compromiso con el desarrollo sostenible. *ANDI Noticias*. Retrieved from <https://www.andi.com.co/Home/Noticia/3294-sector-papelerero-en-colombia-crece-y-se-d>.
- FAO. (2022). Información básica | Conjunto de herramientas GFS | Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Inventario forestal. <https://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules-alternative/reducing-deforestation/basic-knowledge/es/>
- Suraj, M., & Khan, A. (2018). Environmental Impact of Paper Industry. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(5). <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01417-y>
- INFOBAE. (2022). El gobierno Petro anunció su apoyo al programa de Bloomberg a favor del medio ambiente - Infobae. <https://www.infobae.com/america/colombia/2022/12/01/el-gobierno-petro-anuncio-su-apoyo-al-programa-de-bloomberg-a-favor-del-medio-ambiente/>

- Revista La Nación. (2010). Más bosques, menos papel - LA NACION. <https://www.lanacion.com.ar/espectaculos/mas-bosques-menos-papel-nid1313362/#>
- Revista La República. (2022). El salario mínimo y el auxilio de transporte subirán a \$1,3 millones el próximo año. Recuperado 24 de febrero de 2023, de <https://www.larepublica.co/economia/el-salario-minimo-y-el-subsidio-de-transporte-subiran-a-1-3-millones-el-proximo-ano-3509712#>
- Revista La República. (s. f.-b). La abundante escasez celulosa lanzaría los precios de papel higiénico por las nubes. Recuperado 24 de febrero de 2023, de <https://www.larepublica.co/globoeconomia/la-abundante-escasez-celulosa-lanzaria-los-precios-de-papel-higienico-por-las-nubes-3358677>
- Revista Portafolio. (2022). Uso de papel higiénico en Colombia es de 6 kilos anuales por persona | Finanzas | Economía | Portafolio. Recuperado 24 de febrero de 2023, de <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/papel-higienico-colombia-kilos-anuales-persona-312980>
- Teschke, K., Demers, P., Teschke, K., Keefe, A., Teschke, K., Astrakianakis, G., ... & Teschke, K. (2001). Industria del papel y de la pasta de papel sectores basados en recursos biológicos. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo III, 71-1.
- Solís, F. M. V., Romero, J. G. I. G., & Solís, M. D. V. (2014). La Cultura Organizacional y las Estrategias Competitivas en la industria de celulosa, cartón y papel en México. *AD-minister*, (25), 97-120.
- Cortés, M.C. and Fernando, M.P.M. (2018) *Estudio de los Residuos Sólidos en Colombia*. Bogotá, Colombia: Universidad Externado de Colombia.
- Poda de árboles y corte de césped* (no date) UAESP. Available at: <https://www.uaesp.gov.co/content/poda-arboles-y-corte-cesped#seccion4> (Accessed: March 19, 2023).
- León Ramiro, Bonifaz, N. and Gutiérrez Francisco (2018) *Pastos y Forrajes del Ecuador: Siembra y producción de Pasturas*. Quito, Ecuador: Abya Yala.
- Decreto 383 de 2018 (Alcaldía mayor de Bogotá, D.C.). Por medio del cual se modifica y adiciona el Decreto Distrital 531 de 2010, y se toman otras determinaciones. Julio 12 de 2018.

- Dylan D. Furszyfer Del Rio, Benjamin K. Sovacool, Steve Griffiths, Morgan Bazilian, Jinsoo Kim, Aoife M. Foley, David Rooney, Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 167, 2022, 112706, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706>.
- González C, José, Galvis S, Diana, & Hurtado T, Luis. (2014). La distribución Beta Generalizada como un modelo de sobrevivencia para analizar la evasión universitaria. *Estudios pedagógicos (Valdivia)*, 40(1), 133-144. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07052014000100008>
- Mandeep, Guddu Kumar Gupta, Pratyosh Shukla, Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: Challenges, perspectives and innovations, *Bioresource Technology*, Volume 297, 2020, 122496, ISSN 0960-8524, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122496>.
- D. Chakraborty , S. Dahiya , K. Amulya , V. Srivastav , SV Mohan. Valorización de residuos de papel y celulosa: oportunidades y perspectivas de la biorrefinería Lodos industriales y municipales , Elsevier ( 2019 ) , págs. 623 - 656 ,10.1016/B978-0-12-815907-1.00027-1
- M. Grötzner , E. Melchior , LH Schroeder , AR dos Santos , KG Moscon , MA de Andrade , SHS Martinelli , CR Xavier. Efluentes de fábricas de pulpa y papel tratados mediante la combinación de procesos de coagulación-floculación-sedimentación y fenton. *Contaminación del suelo del aire del agua.* , 229 ( 364 ) ( 2018 ) ,10.1007/s11270-018-4017-5
- VM Basso , LAG Jacovine , RR Alves , SR Valverde , FLda Silva , D. Brianezi. Avaliação da influência da certificação florestal no cumprimento da legislação ambiental em plantações florestais. *Rev. Árvore* , 35 ( 2011 ) , págs. 835 - 844 ,10.1590/S0100-67622011000500009
- SK Kujur. Uso de insumos tradicionales y tecnología industrial avanzada en valor agregado dentro de la industria de pulpa y papel en India. *J. Sostener. Para.*, 38 ( 2019 ) , págs. 542 - 557 ,10.1080/10549811.2019.1598439
- A. Toppinen , V. Hänninen , K. Lähtinen. ISO 26000 en la evaluación de la calidad de la comunicación de la RSE: cartas de los directores ejecutivos y redes sociales en la industria mundial de la pulpa y el papel. *Soc. Responsable J.*, 11 (2015), págs. . 702-715 ,10.1108/SRJ-09-2013-010

- I. Vanermen , B. Muys , K. Verheyen , F. Vanwindekens , L. Bouriaud , P. Kardol , L. Vranken. ¿Qué saben los científicos y administradores sobre la biodiversidad del suelo? Mapeo de conocimiento comparativo para el manejo forestal sostenible. Para. política económica, 119 (2020), artículo 102264 ,10.1016/j.forpol.2020.102264
- S. Sepasi , U. Braendle , AH Rahdari. Informes integrales de sostenibilidad en instituciones de educación superior. Soc. Responsable J., 15 ( 2019 ) , págs . 155-170 ,10.1108/SRJ-01-2018-0009
- S. Ofosu , KB Boadu , KA Afrifah. Idoneidad de *Chrysophyllum albidum* del bosque húmedo semicaducifolio de Ghana como materia prima para la fabricación de productos a base de papel. J. Sostener. Para. , 39 ( 2020 ) , págs. 153 - 166 ,10.1080/10549811.2019.1623052
- H. Elnakar , ID Buchanan. Gestión de efluentes de plantas de celulosa y papel. Entorno de agua. Res. , 91 ( 2019 ) , págs. 1069 - 1071 ,10.1002/wer.1179
- Douglas M. Moraes, Paulo H. Silva, Izabela Simon Rampasso, Rosley Anholon, Osvaldo L.G. Quelhas, José R. Farias Filho, Roberto F. Toledo, Environmentally-responsible corporate: Actions analysis of Latin American pulp and paper industry, Environmental Challenges, Volumen 4, 2021,100153, ISSN 2667-0100, <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100153>.
- Universidad de Burgos. (2022). Licencia de STATGRAPHICS Centurión XIX. Tomado de <https://www.ubu.es/servicio-de-informatica-y-comunicaciones/catalogo-de-servicios/software-tu-disposicion/software-disposicion-de-la-comunidad-universitaria/licencia-de-statgraphics-centurion-xix#:~:text=STATGRAPHICS%20Centuri%C3%B3n%20XIX%20es%20una,integrado%20de%20an%C3%A1lisis%20de%20datos>.