



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES  
ACÚSTICAS DE UN PANEL A PARTIR DE LA CAÑA DE MAÍZ

AUTOR

Wilson Andrés Jaramillo Cevallos

AÑO

2019



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES ACÚSTICAS  
DE UN PANEL A PARTIR DE LA CAÑA DE MAÍZ

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniero de Sonido y Acústica

Profesor Guía

Ph.D. Virginia Puyana Romero

Autor

Wilson Andrés Jaramillo Cevallos

Año

2019

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Obtención y caracterización de las propiedades acústicas de un panel a partir de la caña de maíz, a través de reuniones periódicas con el estudiante Wilson Andrés Jaramillo, en el semestre 201920, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

---

Virginia Puyana Romero

Dottorato di Ricerca in Rappresentazione, Tutela e Sicurezza dell' Ambiente e  
delle Strutture e Governo del Territorio

C. I. 1758988354

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Obtención y caracterización de las propiedades acústicas de un panel a partir de la caña de maíz, de Wilson Andrés Jaramillo Cevallos, en el semestre 201920, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

---

Miguel Ángel Chávez Avilés

Master of Science in Sustainable Building Engineering

C. I. 1710724848

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”

---

Wilson Andrés Jaramillo Cevallos

C. I. 1003611777

## AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por darme la fortaleza para culminar este paso en mi vida, a mis padres, a toda mi familia, a mi novia, amigos docentes y compañeros que siempre me han estado motivando para alcanzar este objetivo.

## DEDICATORIA

Este trabajo representa el esfuerzo que mis padres, mi hermana y mi abuelito Segundo, han hecho conmigo, dándome todo el apoyo necesario para culminar esta meta académica y profesional en mi vida.

## RESUMEN

En gran parte del territorio de Ecuador, especialmente en los campos de la región Sierra, se pueden apreciar grandes extensiones de siembra de la planta de maíz. Uno de los principales usos este vegetal es el consumo alimenticio. Además de servir como alimento, la planta de maíz permite que partes como las hojas, el tallo o las flores puedan utilizarse de diversas formas, como alimento para animales, material de combustión, papel, productos artesanales, entre otras.

Este trabajo se centra en el tallo del maíz, para la elaboración y obtención de un material acústico a base de fibras. Su origen natural hace que su proceso de fabricación tenga un impacto amigable para el medio ambiente, permitiendo una mejora en el área de acondicionamiento acústico.

Al ser un material ecológico permite reemplazar a los materiales sintéticos, que se derivan de un proceso nocivo para el entorno ambiental y que por lo general llegan a ser muy costosos.

Se han elaborado paneles de 6, 12 y 24mm de espesor, utilizando como aglomerantes el barro, la goma líquida y yeso. Para la realización de los paneles se mezcló la fibra del tallo de maíz y el aglutinante. Tras el secado de los paneles y la obtención de las muestras se ejecutaron las mediciones de las muestras a través del tubo de impedancia o tubo de "Kundt" conforme a la normativa UNE EN ISO 10534-2, que determina: "el coeficiente de absorción y la impedancia acústica en tubos de impedancia."

Posteriormente se efectuó un cálculo estadístico de la incertidumbre para todas las muestras en la etapa de medición, además del cálculo de absorción global y la absorción promedio. Estos datos fueron utilizados para comparar entre los diferentes espesores, así como también entre los distintos aglomerantes.

Finalmente, se realizó un análisis crítico y descriptivo en el cual se estimó el desempeño acústico para cada una de las combinaciones según el espesor y el tipo de aglomerante. También se efectuó una comparativa entre la caña de maíz y la caña de azúcar, ya que los dos tipos de fibra son similares.



## **ABSTRACT**

In a major part of Ecuador's territories, especially in the rural areas of the Andes, corn plants are widely spreaded. Most commonly, corn serves as a food source for human beings, although it can furthermore be divided into its components which are leaf, stem and flower. Those apply for varies purposes, such as but not limited to livestock food source, compost material, paper as well as arts and craftwork.

This assignment will focus on the corn's stem used for the process and extraction of an acoustic material based on the plant's fiber. Its natural origin provides that the manufacture has an ecologically beneficial impact on the environment and allows an improvement of acoustic conditions.

Due to its ecological source, it may substitute all kinds of synthetic material. Besides, artificial substances emerge from a polluting process, additionally to its higher cost.

Panels of 6, 12 and 24mm thickness have been made. Therefore, the corn plant's fiber and a connecting component, for example clay, liquid glue or gypsum, have been mixed. While the desiccation of the panels and the extraction of samples, measurements have been taken by impedance "Kundt" referring to the UNE EN ISO 10534-2 formula that determines: "the coefficient of the absorption and the acoustic impedance tubes."

Hereafter, several factors must be statistically determined. This includes measurement uncertainties as well as calculations on global and average absorption. Those results were considered to compare different densities and among multiple connecting components.

Finally, a critical and representative analysis takes place in which the acoustic covering is estimated for each combination, depending on the density and the type of connecting component used. Last but not least, a comparison between the acoustics characteristics of corn and sugar cane has been made, considering seeing that both fibers are quite similar.

# ÍNDICE

1. Capítulo I: Introducción .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Alcance.....	5
1.3. Justificación .....	5
1.4. Objetivos .....	6
1.4.1. Objetivo general.....	6
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
2. Capítulo II: Marco teórico .....	6
2.1. Conceptos teóricos.....	6
2.1.1. Propagación de ondas en ductos .....	6
2.1.2. Coeficiente de absorción sonora .....	9
2.1.3. Coeficiente de absorción sonora promedio .....	10
2.1.4. Coeficiente de absorción sonora práctico.....	11
2.1.5. Coeficiente de absorción acústica global o ponderada.....	11
2.1.6. Indicadores de forma L, M o H.....	12
2.1.7. Características de los materiales absorbentes .....	13
2.1.8. Características de los materiales porosos .....	14
2.2. Propiedades acústicas de las fibras vegetales .....	19
2.2.1. Fibra Planta de maíz.....	19
2.2.2. Fibra del bagazo caña de azúcar.....	22
2.2.3. Fibra de coco .....	22
2.2.4. Fibra de kenaf.....	23
2.2.5. Fibra de cáñamo.....	24
2.2.6. Fibra de Lino.....	25
2.3. Instrumentación de medición .....	26
2.3.1. Tubo de impedancia “Kundt” .....	26
2.3.2. Software ACUPRO Spectronics.....	27
3. Capítulo III: Metodología .....	29
3.1. Fibra vegetal de la caña de maíz .....	31
3.2. Recolección de la materia prima.....	32
3.3. Tratamiento de la materia prima .....	34

3.4.	Prueba de secado de las fibras, intemperie vs horno. ....	36
3.5.	Aglutinantes barro, goma blanca, yeso.....	38
3.6.	Procedimiento de elaboración de paneles .....	38
3.6.1.	Costos de los materiales utilizados para la elaboración de paneles.....	43
3.7.	Procedimiento de medición y caracterización de las muestras.....	45
3.7.1.	Diagrama de interconexión para los instrumentos de medición ...	46
3.7.2.	Procedimiento de validación de los datos obtenidos para cada muestra en Excel. ....	49
4.	Capítulo IV: Resultados y Análisis .....	52
4.1.	Descripción de resultados .....	52
4.2.	Fibra de caña de maíz con barro .....	53
4.2.1.	Valores globales de absorción de caña de maíz-barro.....	53
4.2.2.	Cálculo de la incertidumbre de caña de maíz-barro .....	54
4.3.	Fibra de caña de maíz con goma blanca .....	56
4.3.1.	Valores globales de absorción caña de maíz – goma .....	56
4.3.2.	Cálculo de la incertidumbre de caña de maíz-goma.....	57
4.4.	Fibra de caña de maíz con yeso.....	58
4.4.1.	Valores globales de absorción de caña de maíz – yeso.....	58
4.4.2.	Cálculo de la incertidumbre caña de maíz-yeso .....	59
4.5.	Análisis de resultados de las muestras del mismo espesor con diferente aglutinante.....	60
4.5.1.	Comparación de las muestras 6mm .....	60
4.5.2.	Comparación de las muestras 12mm .....	61
4.5.3.	Comparación de las muestras 24mm .....	62
4.6.	Evaluación de la prueba de secado para la fibra de caña de maíz expuesta al horno.....	63
4.7.	Comparación de las muestras “caña de maíz vs caña de azúcar”.....	64
5.	Conclusiones y Recomendaciones .....	69
5.1.	Conclusiones.....	69

5.2. Recomendaciones .....	71
REFERENCIAS .....	72
ANEXOS .....	76

## **1. Capítulo I: Introducción**

### **1.1. Antecedentes**

Con el paso del tiempo, se han venido desarrollando nuevas ideas y aplicaciones de diseño e implementación acústica de los materiales, para conseguir una mejor sonoridad en los espacios. Cabe recalcar que en el mercado existen diferentes tipos de materiales que, atendiendo a su nivel de procesamiento y respeto por el medio ambiente, se denominan sintéticos o ecológicos (Velázquez, Peláez, & Giraldo, 2016).

La mayor parte de materiales ecológicos que se usan en acústica, se derivan de plantas que son cultivadas en diferentes áreas del mundo. Una de los beneficios y uso habitual de este tipo de materiales es la elaboración de paneles acústicos, obtenidos de los desechos orgánicos vegetales, que comúnmente se denominan bagazo. Por este motivo, se considera que las fibras naturales se están convirtiendo en una alternativa para aplicaciones industriales, debido a los beneficios que pueden aportar a la acústica, reemplazando de esta manera a los materiales sintéticos.

Entre las diferentes fibras vegetales hay una variedad de materiales compuestos de polímeros, basados en fibras de celulosa, que se han desarrollado utilizando diversas estrategias sintéticas.

Varios estudios han demostrado que la fibra natural tiene distintas ventajas para lograr varios productos desarrollados a partir de productos como : el coco, el yute, el fique, kenaf, la caña de azúcar, el cáñamo, entre otros (Thakur & Thakur, 2014).

Actualmente estos materiales se usan para conseguir adecuar acústicamente las salas, de tal forma que puedan dedicarse al uso al que están previstas. Las intervenciones consisten en tratar las superficies mediante paneles, con el fin de acondicionar y mejorar la calidad sonora dentro de la misma (Mamtaz, Fouladi, & Al-Atabi, 2016). Estos tratamientos hoy en día se realizan utilizando materiales sintéticos, los que se adaptan al acondicionamiento y aislamiento acústico.

No obstante, estos materiales acústicos sintéticos pueden resultar perjudiciales para la salud, ya que contienen compuestos químicos difíciles de manipular sin un determinado control. Por otra parte, a diferencia de estos, los materiales de origen natural se pueden tratar, desarrollar e incluso unir con otros tipos de elementos para aumentar la calidad de su uso o aplicación. Aspecto que supone un valor agregado para la aplicación y mejora de la acústica, reemplazando a los materiales de fibras sintéticas (Peng, Song, Wang, & Wang, 2015).

Para la producción de los materiales con fibra, hay que resaltar que no todos son de origen vegetal, sino que en su mayoría son materiales compuestos por derivados de minerales u otras combinaciones químicas como: la lana mineral (lana de vidrio, lana de roca), el corcho, la espuma de resina, la espuma de poliuretano, etc., de fácil y de común comercialización. Estas fibras están disponibles en su gran mayoría en el mercado acústico. Sin embargo, algunos de estos elementos son muy costosos y nocivos para el medio ambiente.

Por otra parte, para la fabricación de estos paneles con materiales sintéticos, se utilizan máquinas industriales, ya que muchos de ellos están constituidos a base de una tecnología de electro hilatura de polímeros sintéticos (Blanes, Marco, Alba, Del Rey, & Escuder, 2010) .

Ciertamente, en Latinoamérica la siembra y producción de diversos productos agrícolas han sido tradicionalmente realizada por los campesinos, siendo sus cosechas utilizadas para el consumo alimenticio. Por otra parte, y con el paso de los años, la utilización de sus residuos se ha incrementado para fines artesanales a través de su transformación en fibras, que podrían convertirse en una importante fuente de recursos en beneficio de distintos sectores afectados por la crisis económica. Estas fibras naturales e industrializadas, en los dos últimos años han cobrado importancia en el mercado mundial, al aumentar su demanda en los países del Norte, sustituyendo a las sintéticas en diferentes aplicaciones.

Por otra parte, en Ecuador, en el año 2000 se ha creó el “Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Industrial de Fibras Naturales”; a través del “Instituto Nacional de Estadística y Censos” (INEC), para ubicar las funciones, la

capacidad de recuperación, el control de producción y las posibilidades de mejorar las distintas técnicas de tratamiento. Por lo tanto, los datos que pertenecen a las investigaciones de esta entidad contribuyen al desarrollo de nuevos materiales para distintas aplicaciones, entre ellas la acústica. Además, que extendió y promovió el cultivo y comercialización de ciertas plantas, para lograr un desarrollo económico (Kintto, 2016).

De esta manera, se ha venido analizando el comportamiento de ciertas fibras procedentes de plantas que se dan en el Ecuador para un fin acústico, por ejemplo: la fibra de la caña de azúcar o la fibra coco. Del mismo modo, se está extendiendo la idea de estudiar el comportamiento acústico de la caña de maíz, producto que en la actualidad se da en la mayoría de los campos serranos del Ecuador y en ciertas provincias de la costa. La recolección se realiza por medios manuales, en determinadas temporadas del año (Sumba, 2013).

En base a las características de este tipo de material se ha realizado un estudio para obtener el porcentaje de celulosa de las hojas del maíz (Tang, Zhang, Zhang, Zhuang, & Yan, 2018), así como también del bagazo de la caña de azúcar (Arroyo & Méndez, 2018).

La aplicación principal del maíz dentro del campo acústico consiste en el aprovechamiento de sus propiedades de absorción en un determinado rango de frecuencias. Por lo que, ya se han realizado estudios de algunas partes de esta planta, como la mazorca, las hojas y el grano en sí. En dichos estudios se han determinado por el método de tubo de impedancia la absorción y la respuesta en frecuencia (Guzel, Yilmaz, & Deveci, 2018).

El método del tubo de impedancia consiste en la interacción de ondas planas generadas por un driver (altavoz), que a su vez son captadas por dos micrófonos de medición con alta sensibilidad, obteniendo una señal de transferencia mediante un sistema análogo/digital. Es decir, que se obtiene una respuesta de absorción sonora en frecuencias mediante la utilización de software asociado al tubo de impedancia (Tang et al., 2018).

Estudios en los que se realizaron comparaciones de fibras naturales, con y sin aglomerante, determinaron que es necesario añadir materiales o compuestos adicionales, como polímeros para aumentar la durabilidad y funcionalidad del panel. Estos estudios permitieron una mejor adaptación de la microestructura de la fibra con aglutinante, ya que amplía el rendimiento de dicho material para su aplicación como panel absorbente (Sari, Wardana, Irawan, & Siswanto, 2016).

Los resultados obtenidos de este tipo de material determinaron que las hojas o la cáscara de maíz son eficientes en medias y altas frecuencias. Además, el uso de fibra de cáscara de maíz se considera renovable, ya que es un desecho natural comúnmente denominado bagazo, que no representa ningún daño para salud humana.

Según Sari et al. (2016). Los resultados obtenidos de las hojas indican que este tipo de fibra posee absorción acústica próxima al 100% en la alta frecuencia, oscilando en el rango de 1.6–3.2 kHz para muestras de fibra que fueron tratadas con 2% y 5% de concentrados de NaOH (Hidróxido de sodio). Esto quiere decir que las fibras que fueron tratadas absorben más energía en relación con las fibras que son netamente naturales.

En base a las investigaciones citadas, se propone desarrollar paneles absorbentes a base del tallo de maíz, para evaluar el comportamiento acústico siguiendo la metodología utilizada para el proceso y creación de la caña de azúcar, debido a la similitud de la composición de las fibras, asumiendo el proceso de elaboración por (Jiménez Salinas & Ochoa Santín, 2014).

Se espera que los resultados obtenidos tengan un comportamiento similar a la de la caña de azúcar o asemejarse a sus características acústicas ya que físicamente las fibras al secarse son parecidas. Por lo tanto, se podría aprovechar este tipo de fibra para combinar con otros aglomerantes y obtener una respuesta eficiente para el uso de un panel acústico que sea amigable con el medio ambiente.



## **1.2. Alcance**

El presente trabajo propone la realización de paneles acústicos a base de bagazo del tallo de maíz. Este proceso conlleva la utilización de materiales que permitan que las fibras se unan y se mezclen, tales como pegamento blanco, yeso o barro. Los paneles acústicos poseen diferentes espesores. Sus propiedades acústicas se obtendrán mediante ensayos basados en la norma UNE-EN\_ISO 10534-2 realizados en un tubo de impedancia. Gracias a la aplicación de la citada norma, se determinará el coeficiente de absorción acústica que es la información que desde el punto de vista interesa del material.

Parte del trabajo consta de la evaluación del cálculo estadístico de incertidumbre de muestras realizadas y la comparación de resultados entre las muestras de los paneles de la caña de maíz y la caña de azúcar obtenidos en estudios anteriores. Finalmente, se obtendrá un criterio analítico del comportamiento de la fibra de maíz, mediante las curvas obtenidas en cada comparativa.

## **1.3. Justificación**

La presente tesis tiene como finalidad evaluar el potencial acústico de la fibra obtenida del tallo de maíz, a través del desarrollo de la creación de paneles acústicos, permitiendo que su progreso sea fácil de elaborar, evitando causar efectos nocivos al medio ambiente. El enfoque de utilización de este material es el acondicionamiento acústico, por lo general en espacios cerrados.

Además, el uso de este material permite que sea una opción para reemplazar a los materiales sintéticos, mismos que son complicados de desarrollar artesanalmente, llegando a ser muy costosos y difíciles de manipular por sus efectos secundarios, requiriendo un previo control de manipulación e instalación.

El aporte de este trabajo es el uso de la caña de maíz, que se obtiene a partir del tallo de la misma planta. El origen de esta idea surge por la similitud de la fibra de la caña de maíz con la de la caña de azúcar, planta que se ha demostrado que puede utilizarse para el tratamiento acústico de salas (Arroyo & Méndez, 2018). Dada la gran producción de esta planta, no se prevén problemas

para la producción comercial de los paneles acústicos que puedan obtenerse. Ya que en el Ecuador se cultiva en grandes cantidades especialmente en las zonas andinas del país.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. Objetivo general**

Determinar las propiedades de absorción acústica en paneles elaborados a base de la caña de maíz, a través de distintos procesos de elaboración.

##### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Analizar el comportamiento de la absorción acústica del panel de caña de maíz para distintos espesores.
- Analizar el comportamiento de la absorción acústica del panel de caña de maíz para diferentes aglutinantes.
- Analizar el comportamiento de la absorción acústica del panel de caña de maíz para distintos métodos de secado.
- Comparar los resultados de absorción acústica obtenidos para la caña de maíz con otras fibras vegetales.

## **2. Capítulo II: Marco teórico**

### **2.1. Conceptos teóricos**

En la sección que se desarrolla a continuación se dan a conocer los conceptos básicos y necesarios para el entendimiento de este trabajo.

En lo que concierne a la teoría utilizada, se definieron los términos relacionados al fenómeno de absorción acústica, que es parte fundamental del proyecto de investigación y el tratamiento acústico a base de materiales absorbentes.

#### **2.1.1. Propagación de ondas en ductos**

En un determinado ducto la propagación de la energía sonora viene dada por las denominadas “ondas estacionarias”, que son formadas por la interacción de dos

ondas que poseen la misma naturaleza, con igual amplitud, misma longitud de onda, pero que siguen un camino en sentido opuesto a través de un tubo. Esta propagación da lugar, cuando las ondas se las confina a un medio con límites rígidos, en el que permiten que se produzca el efecto de reflexión (Cabello, 2010).

La manera de representar matemáticamente este fenómeno viene dada por estas expresiones.

$$y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$y_2(x, t) = A \sin(kx + \omega t) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Entonces la suma da como resultado:

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = 2A \sin(kx) * \cos(\omega t) \quad (\text{Ecuación 3})$$

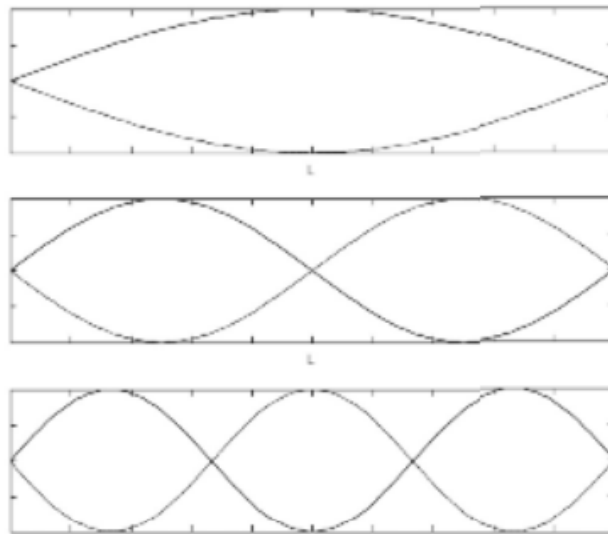
La amplitud del movimiento armónico dentro del medio será cero. Si para algunos de los valores de  $x$ , cuando las coordenadas de estos puntos que no vibran son:

$$x_n = n \frac{\lambda}{2} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Se dice que la onda ocupa nodos en esos valores de  $x$ , y que la distancia entre los dos nodos consecutivos es igual a  $\lambda/2$ .

$$x_n = (2n - 1) \frac{\lambda}{4} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Para el caso en el que la onda se propaga en un medio con sentido opuesto, estas son provocadas por el fenómeno de la reflexión en los límites, de esta forma para un tubo abierto se tiene como resultado este efecto.



*Figura 1.* Primeras tres frecuencias de resonancia para un tubo abierto.

Tomado de (Cabello, 2010, p.2).

Para las ondas estacionarias en tubos, el aire vibrará en ciertas frecuencias determinadas que dependen de la longitud del tubo, como la presión del aire dentro del mismo. Existen dos formas en las que puede encontrarse este tipo de ondas, como es el tubo abierto y cerrado.

Este extremo cerrado también pertenece a un antinodo de presión, es decir una posición donde la variación de presión es máxima. Por el contrario, para un tubo abierto es un antinodo de desplazamiento y un nodo de presión.

Las ecuaciones y las gráficas de onda de un tubo abierto son similares a las que se establecen en un modelo de cuerda con los dos extremos fijos. Por otro lado, para un tubo cerrado son diferentes (Cabello, 2010).

A continuación, se muestran las gráficas de un modelo de aparición de las tres primeras frecuencias para un tubo cerrado.

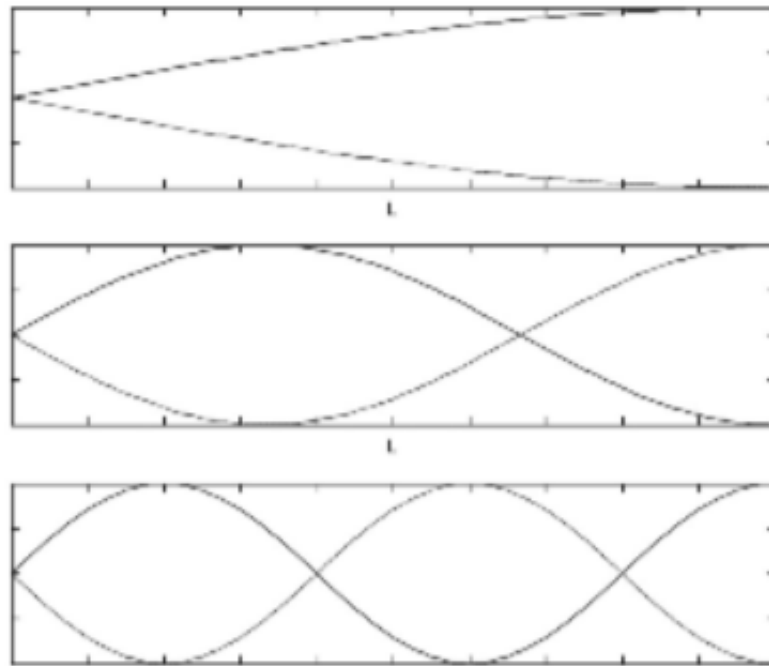


Figura 2. Primeras tres frecuencias de resonancia para un tubo cerrado.

Tomado de (Cabello, 2010, p.03).

### 2.1.2. Coeficiente de absorción sonora

Se define como la relación entre la energía absorbida respecto a la energía incidente. Depende del tipo de material, del tipo de montaje, de la superficie base, de la frecuencia del ángulo de incidencia (Sancho, Llinares, & Llopis, 2011).

$$\alpha = \frac{\text{Energía Acústica disipada}}{\text{Energía Acústica incidente}} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Cuando un sonido que se propaga en el aire se encuentra con un obstáculo incide sobre un elemento compuesto por un determinado material, la energía sonora de la onda que incide en él se divide en otras tres:

- Reflejada: Parte de la energía de la onda es devuelta por el material.
- Transmitida: Parte de la energía de la onda atraviesa el material.
- Disipada: Parte de la energía de la onda se disipa por el material.

Cuando la onda acústica incide ( $E_i$ ) atraviesa medios de propagación, parte de la energía vuelve al medio ( $E_r$ ), y parte se transmite hacia el medio de destino ( $E_t$ ). La energía es absorbida ( $E_a$ ) en la frontera de los dos medios.(Penchev, 2010).

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad (\text{Ecuación 7})$$

En la siguiente figura se muestra lo que sucede con una onda acústica al incidir sobre la superficie de un material.

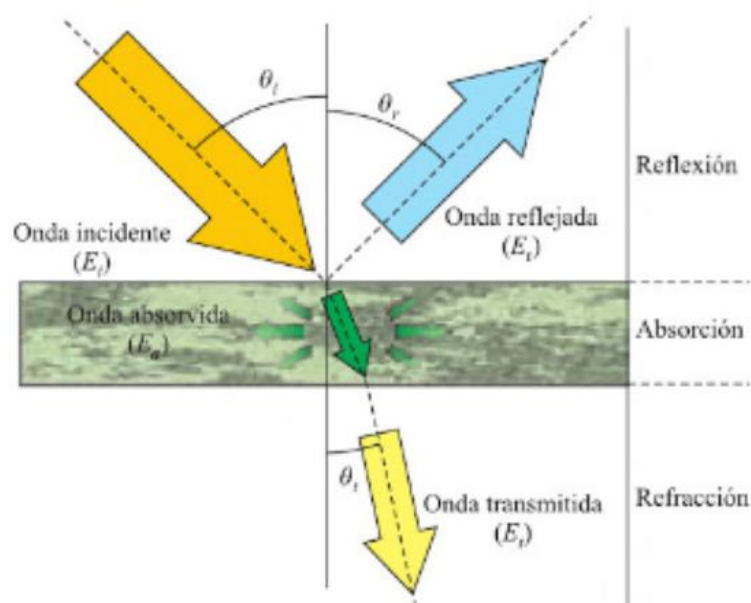


Figura 3. Mecanismos de propagación del sonido que atraviesa un material.

Tomado de (Penchev, 2014, p.01).

En general, mientras mayor es la frecuencia, mayor es su absorción. Para las altas frecuencias la absorción no depende del espesor del material y para bajas frecuencias la absorción aumenta con el espesor (Sancho et al., 2011).

### 2.1.3. Coeficiente de absorción sonora promedio

Conocido como  $\alpha_{promedio}$ , es el resultado de la sumatoria del coeficiente de absorción sonora para una frecuencia específica. Es decir que para una

determinada frecuencia se realizan algunas mediciones y se las promedia para tener un solo valor.

$$\alpha_{promedio(frecuencia)} = \frac{\alpha_{medición1} + \alpha_{medición2} + \alpha_{medición3} + \dots + \alpha_{med..n}}{n} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde n = número de mediciones realizadas para una frecuencia,

#### **2.1.4. Coeficiente de absorción sonora práctico.**

A diferencia del apartado anterior, este parámetro  $\alpha_{pi}$ , sirve para determinar el coeficiente de absorción global ponderado. Se calcula como el promedio del coeficiente de absorción de tres frecuencias sucesivas desde los 100 Hz, hasta 500 Hz (ISO, 1998).

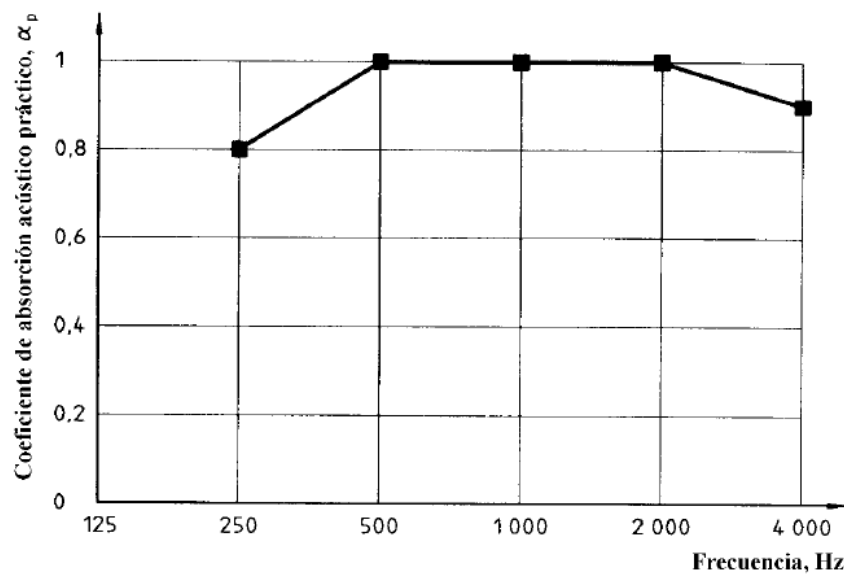
$$\alpha_{pi} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3} \quad (\text{Ecuación 9})$$

#### **2.1.5. Coeficiente de absorción acústica global o ponderada**

$\alpha_w$ , se define como el resultado de la curva de referencia una vez transportada a la frecuencia en “500 Hz”, siendo este el único valor independiente de la frecuencia.

El procedimiento consiste en el desplazamiento de la curva de referencia, a través de una traslación en saltos de “0,05” hasta igualar a la curva de valores del coeficiente de absorción sonoro práctico  $\alpha_{pi}$ . Esta normativa indica que el resultado de la suma de las desviaciones desfavorables sea menor o igual que 0,1 (ISO, 1998).

En la Figura 2, se dan a conocer los valores recomendados por la normativa UNE\_EN ISO 11654 para generar la curva de referencia. . .



Frecuencia	250 Hz	500 Hz	1 000 Hz	2 000 Hz	4 000 Hz
Valor	0,80	1,00	1,00	1,00	0,90

Figura 4. Curva de referencia para evaluar el coeficiente de absorción acústica global o ponderado.

Tomado de (ISO, 1998, p.08).

### 2.1.6. Indicadores de forma L, M o H.

Los indicadores de forma se utilizan para identificar el máximo valor de absorción en relación con la curva de absorción global ponderada. Para este caso según la normativa "ISO 11654", indica que siempre que un coeficiente de absorción acústica práctico  $\alpha_{pi}$ , exceda el valor de la curva de referencia una vez desplazada 0,25 o más, debe añadirse, entre paréntesis, uno o varios indicadores de forma.

Si el exceso de absorción se produce a 250 Hz, se utiliza la notación L. Si el exceso tiene lugar a 500 Hz o a 1 000 Hz, se utiliza la notación M. Si el exceso se produce a 2 000 Hz o a 4 000 Hz, se utiliza la notación H (ISO, 1998).



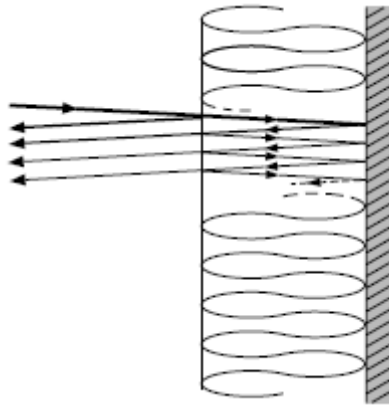
### 2.1.7. Características de los materiales absorbentes

Se puede clasificar los materiales absorbentes como porosos y fibrosos. También se utilizan en el campo de la acústica sistemas absorbentes como los resonadores, con un funcionamiento óptimo en bajas frecuencias.

Los materiales absorbentes permiten un amplio abanico de posibilidades para la adecuación de salas. Estos tipos de materiales absorbentes tienen una amplia aplicación para la adecuación de salas, en la mayoría de los casos en lugares cerrados. Las principales aplicaciones son:

- Prevención o eliminación de los ecos.
- Reducción del nivel de campo reverberante en espacios ruidosos. (restaurantes, fábricas, estaciones, etc.).
- Control de modos normales de vibración en salas (cuartos de ensayo música, estudios de grabación, laboratorios de medición acústica).
- Modificar o reducir el tiempo de reverberación.

Además, los materiales absorbentes tienen un gran número intersticios en los cuales la onda puede incidir. Se produce una transformación de parte de la energía acústica incidente en calor, lo que da lugar a una disipación de la energía. Este efecto se produce porque la onda entra en contacto con las paredes de los poros del material. Cabe mencionar que cuanto más sea el número de espacios o canales, mayor será la absorción producida. La absorción sonora comúnmente es relacionada con “ $\alpha$ ” que indica el coeficiente de absorción de un determinado material (Carrión, 2001).



*Figura 5.* Proceso de disipación de energía en el interior de un material poroso situado delante de una pared rígida.

Tomado de (Carrión, 2001, p.76).

### **2.1.8. Características de los materiales porosos**

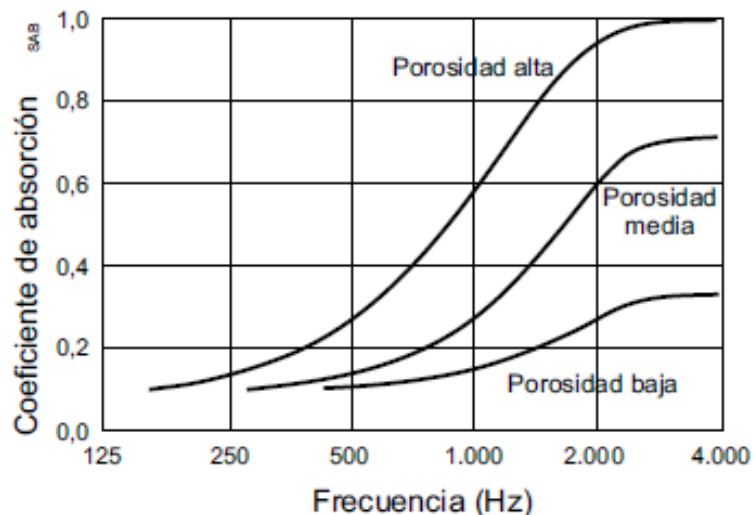
Las características de los materiales absorbentes son dependientes de su elaboración y sus propiedades físicas. Ambos aspectos influyen en los parámetros físicos detallados en los siguientes apartados (Castillo & Costa, 2012).

#### **2.1.8.1. Porosidad del material**

La porosidad se interpreta como la capacidad de un determinado material para poder absorber fluidos a través de los espacios que lo componen. A estos espacios se les denomina “poros”.

El aumento de la porosidad genera un incremento en la absorción sonora todas las frecuencias. Este efecto se produce ya que la penetración de la onda incidente es mayor al aumentar el grado de porosidad, debido a que los huecos del material juegan un papel muy importante para la absorción.

En la siguiente imagen se puede apreciar el comportamiento de la respuesta de la curva de absorción debido a la porosidad de un material genérico.



*Figura 6.* Variación de la absorción en función de la frecuencia de un material absorbente con distintos grados de porosidad alta, media y baja.

Tomado de (Carrión, 2001, p.79).

#### **2.1.8.2. Densidad de material absorbente**

La densidad de un material es una cantidad de masa escalar, es decir una cantidad de unidad de masa en un determinado volumen. Suele definirse por la letra rho  $\rho$ .

Si la densidad de un material es baja, existe menor probabilidad de que existan pérdidas por fricción, y debido a esto la absorción es pequeña, en caso práctico se incrementa la absorción conforme aumenta la densidad.

En efecto, si el valor de absorción disminuye es debido a una escasa penetración de la onda en el material, que genera un efecto de reflexión.

Es aconsejable que los materiales absorbentes para acondicionamiento acústico tengan una densidad aproximada de 40 a 70 Kg/m<sup>3</sup>, sin superar los 100 Kg/m<sup>3</sup>. (Carrión, 2001)

A continuación, se muestra un ejemplo en el cual se comparan las densidades de un material fibroso sintético.

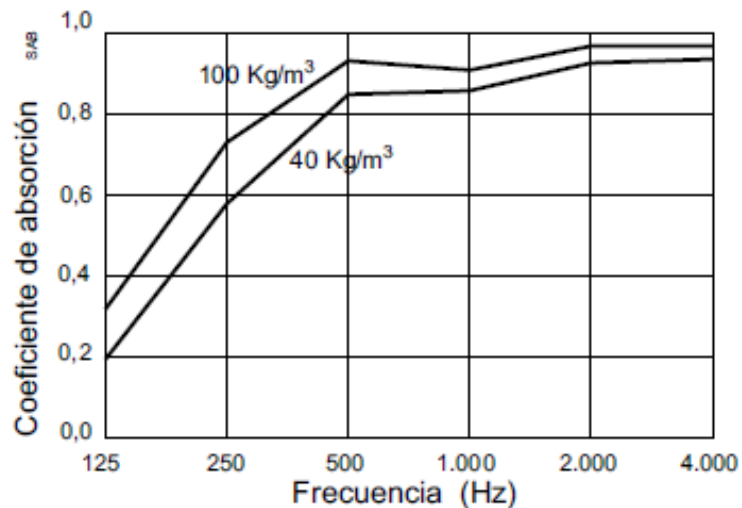


Figura 7. Coeficientes de absorción de una lana de roca de 60mm de espesor y densidades de 40 y 100 Kg/m<sup>3</sup>.

Tomado de (Carrión, 2001, p.80).

### 2.1.8.3. Espesor de material

Conocido también como grosor, es un parámetro de medida utilizado para algunas aplicaciones. En relación a los materiales acústicos se utiliza para caracterizar un objeto a través de la cantidad de partículas o fibras pertenecientes al mismo. Es decir, también como la descripción visual de la anchura, grueso y que tan abultado sea un elemento. Según (Carrión, 2001), para que un material absorba el 99% de su potencial acústico, se debe colocar el material a una distancia de  $\lambda/4$  de la superficie.

Donde “ $\lambda$ ” corresponde la longitud de onda de propagación en función de la frecuencia.

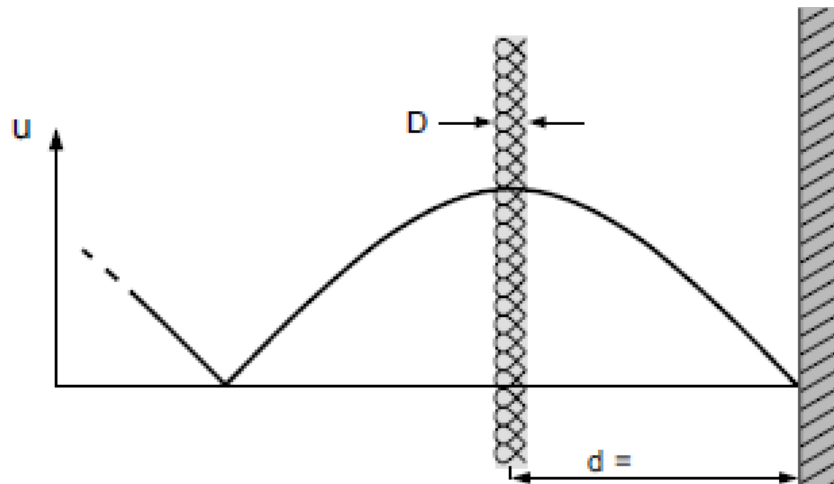
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

c = velocidad del sonido 343 m/s.

f= frecuencia Hz.

La siguiente ilustración indica la posición de colocación del material absorbente.



**D: Espesor del material.**  
**d: Distancia superficie-material absorbente**  
**u: Velocidad de partícula.**

*Figura 8.* Colocación ideal de un material absorbente con referencia a una superficie.

Tomado de (Carrión, 2001, p.82).

Como se puede observar en la imagen “D”, el ancho del material, “d” la distancia entre la pared y “u” la amplitud de la velocidad del sonido. La distancia del material a la pared hace que el conjunto muestra una absorción óptima para aquella frecuencia que cumpla que la  $d = \lambda/4$ , así como múltiplos enteros impares de  $\lambda/4$ .

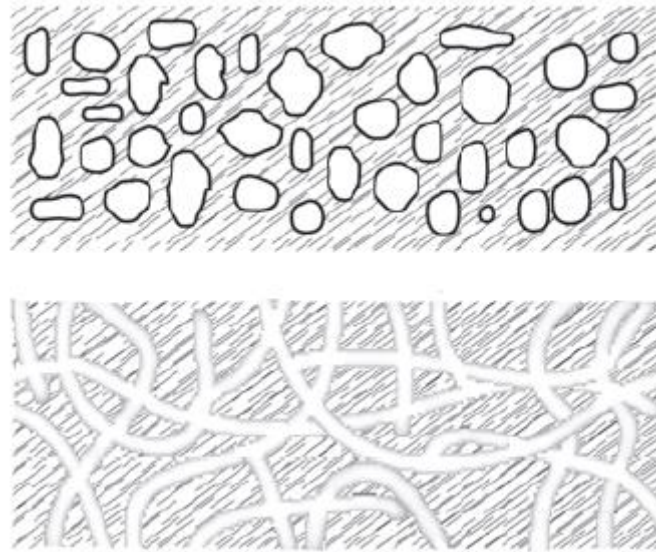
#### 2.1.8.4. Tortuosidad

La tortuosidad  $\alpha_{\infty}$ , es una medida adimensional que se emplea para caracterizar la trayectoria de los fluidos a través de medios porosos. Utilizado en acústica para materiales absorbentes, es la medida geométrica de la desviación entre el camino seguido por la onda acústica y el camino directo (espesor).

Según González, García, Morcillo, & Hernández, (2008), la tortuosidad influye en la absorción máxima reduciéndose la frecuencia y la absorción en mínimas medidas, mientras que para los valores mínimos de absorción es independiente

de la tortuosidad. En definitiva, la tortuosidad es menor cuanto mayor cantidad de orificios tenga el material.

A continuación, se presenta una ilustración en donde se puede evidenciar la constitución microscópica de un material poroso y las múltiples trayectorias por donde puede viajar un determinado fluido.



*Figura 9.* Ilustración de la diferencia entre poro cerrado (superior) y abierto (inferior).

Tomado de (Cox & D'Antonio, 2009, p.157).

#### **2.1.8.5. Resistencia al flujo de aire**

La resistencia al flujo de aire " $\sigma$ " (Rayls/m o  $\text{Ns/m}^4$ ), conocida también como resistividad es la oposición al flujo cuasi estático a través de los poros de un material, o dicho en otras palabras, es la oposición al flujo de energía acústica por fricción entre las partículas de aire y el esqueleto o composición física del material (González et al., 2008).

$$\sigma = \frac{\Delta p}{hc} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

$\Delta p$  = Es la variación existente entre las paredes del material  $\text{N/m}^2$ .

$h$  = Espesor del material

$c$  = Velocidad del sonido 340 m/s.

## **2.2. Propiedades acústicas de las fibras vegetales**

Esta sección describe las características principales de las fibras vegetales utilizadas para el desarrollo de materiales acústicos absorbentes.

En los últimos años, las fibras naturales se han considerado materias primas para producir paneles de absorción de sonido a un costo reducido con relación a los materiales sintéticos. Estas fibras suelen tener buenas propiedades acústicas, térmicas y de aislamiento. Además, no se caracterizan por causar efectos nocivos para la salud y están disponibles en grandes cantidades como producto residual de otros procesos industriales.(Berardi & Iannace, 2015).

### **2.2.1. Fibra Planta de maíz**

El maíz es procedente de América. Su antecesor silvestre del *Zea Mays*, se encuentra en países como: Paraguay, Bolivia y sudeste del Brasil. Las mejores zonas para el cultivo y cosecha del maíz según su climatología son las regiones andinas, Centro América y México, donde se ha observado gran diversidad genética (Morales, 2015).

El maíz es uno de los cultivos más significativas dentro de las zonas andinas, debido al área dedicada al cultivo de esta planta, lo que lo convierte en uno de los mayores sistemas de producción y alimentación para las personas (Morales, 2015).

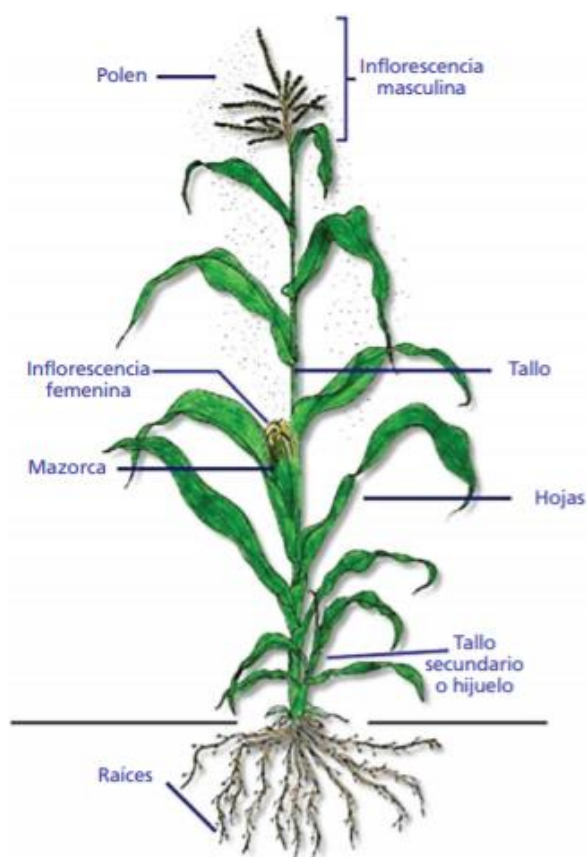
En la serranía ecuatoriana el cultivo de Maíz es uno de los principales motores de economía, debido a la gran cantidad de superficie destinada a su cultivo, que genera una producción reservada principalmente al sector alimentario.

Los maíces más cultivados en la región sierra del Ecuador son el tipo amarillo harinoso que se da en Carchi, Imbabura y Pichincha. Los maíces blancos harinosos se cultivan en la zona central de la sierra, especialmente en

Tungurahua, Chimborazo y Bolívar y el maíz denominado “Zhima” o blanco amorochado se cultiva en la zona sur de la sierra como Cañar y Azuay.

Actualmente en el Ecuador se han identificado 29 razas de maíz, de estas 17 pertenecen a la serranía. La riqueza genética esta región hizo que el INIAP desarrolle una variedad de maíces mejorados (Yáñez, Zambrano, Caicedo, & Heredia, 2013).

A continuación, se indican gráficamente las partes físicas que componen a la planta de maíz.



*Figura 10.* Partes de la composición de una planta de maíz Zea Mays.

Tomado de (Yáñez, 2013, p.09).

El INEC ha desarrollado un estudio en donde constan las principales explotaciones dedicadas a un determinado cultivo, los que son investigados con el fin de mejorar la calidad de las estimaciones de los diferentes productos, entre ellos el maíz desarrolló, esta información está disponible en un portal de



información oficial para el sector agropecuario denominado ESPAC. Según este análisis se ha determinado resultados mostrados en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1.

*Producción de maíz conforme a las regiones del Ecuador.*

<b>Regiones</b>	<b>Maiz Duro choclo [ha]</b>	<b>Maíz duro seco [ha]</b>	<b>Maíz Suave choclo [ha]</b>	<b>Maíz suave seco [ha]</b>
Total	18397	237170	40910	146848
Nacional				
Sierra	1093	43853	40825	145925
Costa	17176	184359	60	910
Resto del país	128	8958	25	13

Adaptado de (INEC, 2016, p.10).

### **2.2.1.1. Bagazo de tallo de maíz**

Los tallos de maíz son un gran aporte para la industria agrícola como un subproducto, generalmente en zonas como Europa, debido al incremento de la demanda de este cereal, tanto para el consumo alimenticio de las personas como de los animales o aplicaciones agroindustriales con el almidón. Por lo general las fibras obtenidas del tallo y otras partes de la planta de maíz se usan como materia prima para la producción de biocombustibles como el etanol.

Es posible obtener altos rendimientos en fibras lignocelulósicas mediante sistemas de pasteado, semi químico y desfibrado mecánico (Mujté et al., 2008)



*Figura 11.* Bagazo de caña de maíz obtenida mediante el proceso de elaboración de materiales absorbentes.

### **2.2.2. Fibra del bagazo caña de azúcar**

Se conoce como bagazo al residuo de los tallos de caña de azúcar, cuando se le aplica el proceso de extracción del jugo de caña. Este tipo de fibra está compuesta en un 45% de fibra, 3% sólidos solubles, 3% sólidos insolubles y 50% de agua, que representa la mayor parte de volumen que abarca una determinada producción industrial de caña. Hoy en día este producto es utilizado como materia prima para diferentes aplicaciones industriales (Olmo et al., n.d.).

### **2.2.3. Fibra de coco**

El coco es una fruta que se deriva de la planta de la palma, habitualmente se encuentra en las zonas tropicales. El coco se ha utilizado en aplicaciones alimenticias, industriales y artesanales. Esta fibra se obtiene del mesocarpio, esta es una capa fibrosa gruesa que cubre la cascara de la tuerca y se produce como un desperdicio de una producción agrícola (Berardi & Iannace, 2015).

La fibra de coco posee buenas características de aislamiento térmico y absorción acústica. En base a la construcción de estos materiales, esta fibra es mezclada con aglutinantes para mejorar las características de rigidez y que no sea inflamable. Además, cabe indicar que se desenvuelve de buena forma para la

absorción acústica en frecuencias bajas y medias, esto dependerá según se aumente el espesor del material (Berardi & Iannace, 2015).

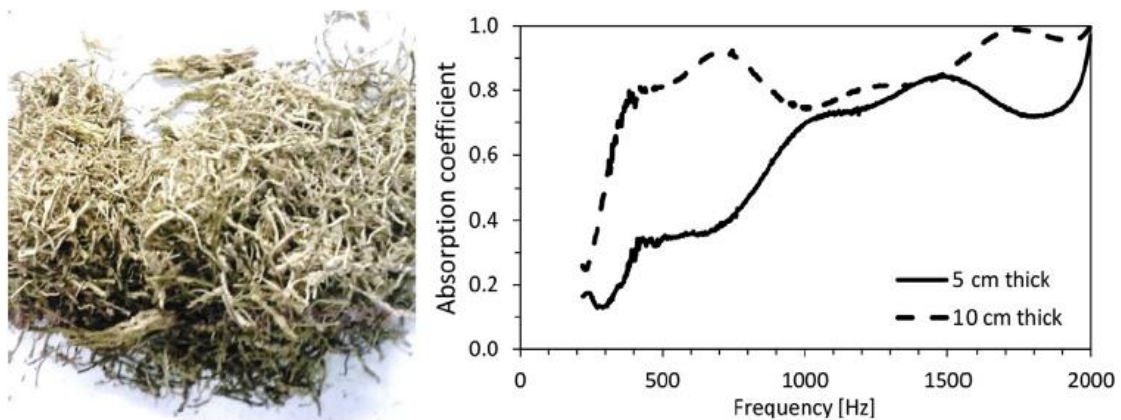


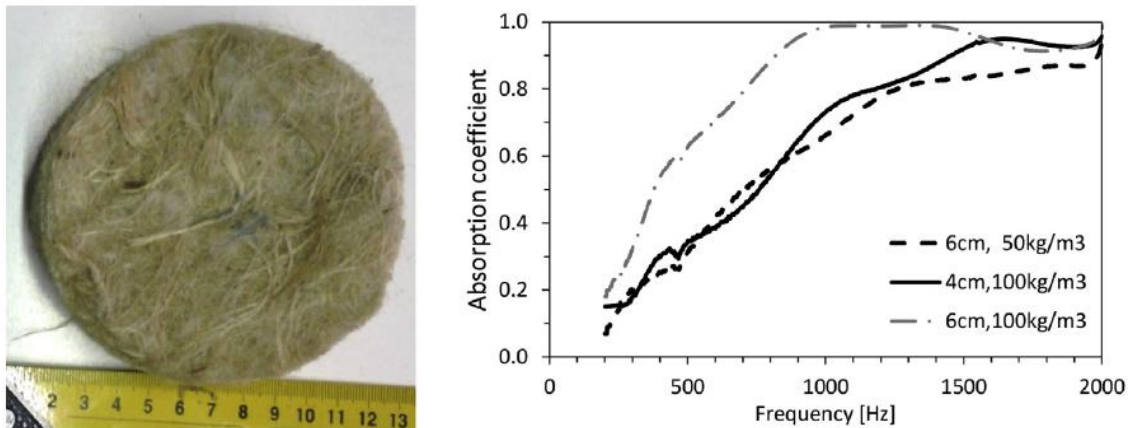
Figura 12. Coeficiente de absorción de la fibra de coco con espesores de 5 y 10cm.

Tomado de (Berardi & Iannace, 2015, p.09).

#### 2.2.4. Fibra de kenaf

La fibra de kenaf, conocida científicamente como “*hibiscus cannabinus*”, es obtenida del tallo de la planta de kenaf, procedente de zona de África, Asia e India. Por lo general esta fibra es utilizada para el proceso de fabricación de bolsas y canastos. Los paneles de kenaf ya están disponibles comercialmente como materiales semirrígidos, estos paneles son de fabricación combinada con fibras de poliéster con el fin de aumentar su rigidez y funcionalidad. Cabe indicar que en su proceso se han realizado con diferentes espesores y densidades. (Berardi & Iannace, 2015).

En general los valores medidos de coeficiente de absorción acústica fueron alto para medias y altas frecuencias, tal como se muestra en la siguiente ilustración.



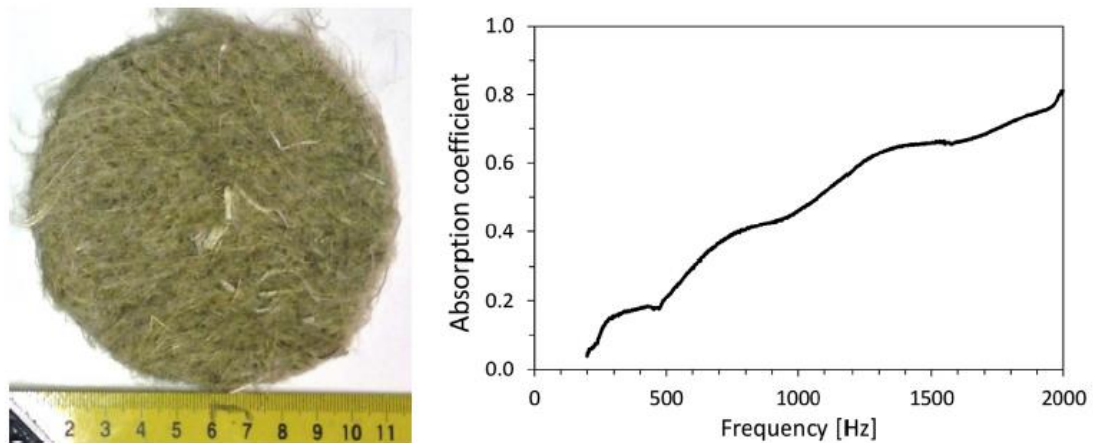
*Figura 13.* Coeficiente de absorción de muestras de kenaf con diferente densidad y espesor.

Tomado de (Berardi & Iannace, 2015, p.06).

### 2.2.5. Fibra de cáñamo

La fibra de cáñamo, conocida científicamente como *cannabis sativa*, se deriva de la planta del cáñamo que se produce en gran parte del mundo en zonas templadas. Esta fibra es utilizada por lo general para aplicaciones industriales textiles. Por otro lado, estos materiales son elaborados acústicamente para fortalecer la parte de aislamiento acústico. En base a su proceso de fabricación, las fibras de cáñamos son mezcladas con sales de soda o boro para mejorar el comportamiento que se expone al fuego situados en lugares que se somete al calor (Berardi & Iannace, 2015).

La fibra de cáñamo tiene buenas propiedades térmicas y acústicas, además de no contaminar el medio ambiente debido a que no contiene sustancias tóxicas. En particular, los resultados de obtención de coeficiente de absorción muestran que tiene una buena adaptación para absorber en medias y altas frecuencias. Aunque por otro lado para las frecuencias bajas son valores despreciables (Berardi & Iannace, 2015).



*Figura 14.* Coeficiente de absorción para la fibra de cáñamo con espesor de 3cm.

Tomado de (Berardi & Iannace, 2015, p.0MAN7).

### 2.2.6. Fibra de Lino

Esta fibra se deriva de la planta herbácea de lino proveniente de la familia de las lináceas. Por lo general su tallo es usado para solucionar procesos de confección de tejidos y la semilla es usada para la extracción de harina o aceite.

El 15% de la masa vegetal, es usado para fines acústicos como material absorbente y aislante, según estudios realizados para este tratamiento acústico de la fibra indican que no se necesita aglutinante sintético, ya que se han realizado dos muestras con capas de lino de 2mm y 10mm utilizados en el tubo de impedancia. Estas muestras caracterizan que tiene propiedades absorbentes algo más bajas, pero ambas muestras deben considerarse para acoplar en paneles tipo sándwich (Asdrubali, Schiavoni, & Horoshenkov, 2012).

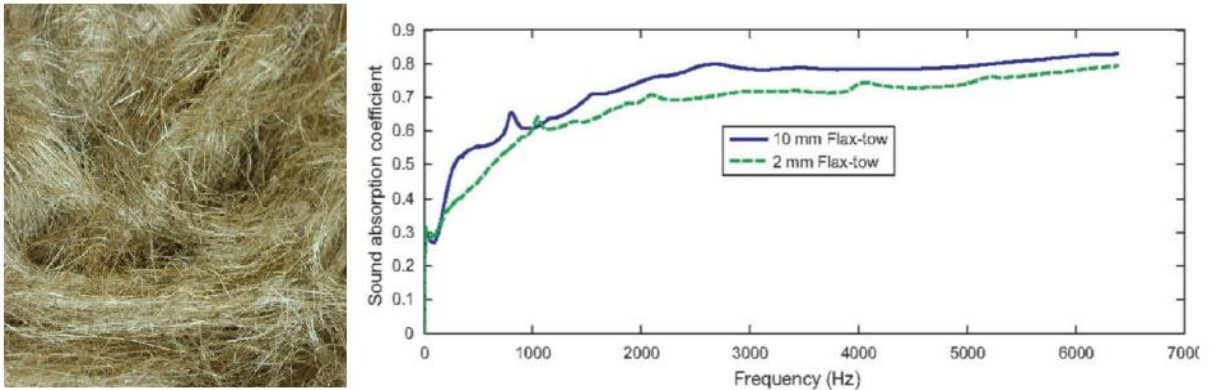


Figura 15. Coeficiente de absorción para dos muestras de diferente medida de la fibra de lino.

Tomado de (Asdrubali et al., 2015, p.14).

### 2.3. Instrumentación de medición

En este apartado se resumen los principales detalles del sistema de medición y las normativas pertinentes que se ocuparon para el desarrollo de medida y muestra de resultados del coeficiente de absorción acústica.

#### 2.3.1. Tubo de impedancia “Kundt”

Se conoce como tubo de impedancia a un sistema para el estudio y obtención de las propiedades acústicas de materiales, a través de muestras físicas.

Los ensayos realizados en las mediciones otorgan información sobre la impedancia acústica y el coeficiente de absorción con incidencia normal de los diferentes materiales.

Para el cálculo de la impedancia y la absorción de los materiales pueden utilizar las normas ISO 10534-2 y ASTM E-1050-98. (Goza, 2014)

Las principales aplicaciones del tubo de Kundt son:

- Medida del coeficiente de absorción de materiales.
- Medida de las pérdidas de transmisión.
- Determinación de la resistividad al flujo.
- Medidas de micrófonos en fase (intensidad sonora)

Hay que destacar que el tubo de impedancia trabaja mediante un modelo de función de transferencia. Por lo que es indispensable contar con dos micrófonos de alta sensibilidad cercanos a la muestra, además de una fuente sonora través de un driver (Altavoz) que sirve para enviar la señal dentro del tubo.

La energía que se propaga a través del tubo es captada por los micrófonos para la determinación y cálculo del factor de reflexión complejo a incidencia normal. Este efecto causa que registre la impedancia superficial del material y el coeficiente de absorción. De esta forma, se genera el resultado en función de la frecuencia y de los parámetros configurados en el software de medición (Navas & Santander, 2011).

La Figura 16 señala el funcionamiento del tubo de impedancia para un tipo de muestra.

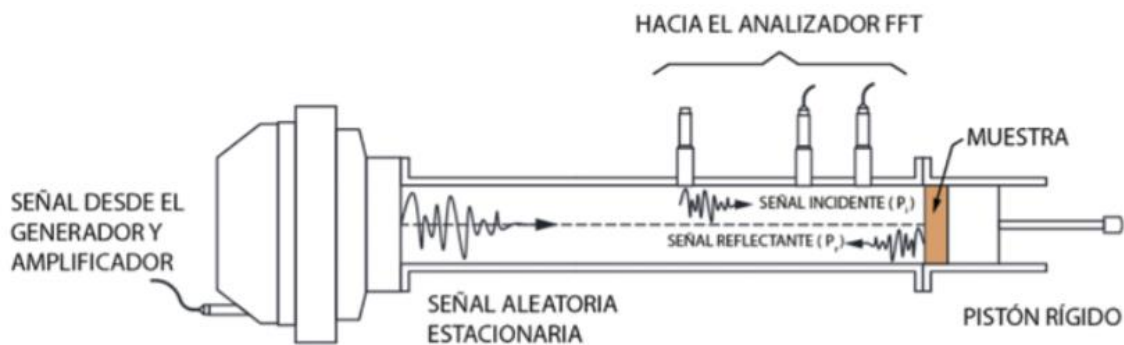


Figura 16. Funcionamiento interno del tubo de impedancia.

Tomado de (Navas & Santander, 2011, p.03).

### 2.3.2. Software ACUPRO Spectronics

El software ACUPRO, se emplea para obtener los resultados de las mediciones desarrolladas en un tubo de impedancia. Generalmente utiliza la implementación de las normativas internacionales ISO\_10534-2 y ASTM E 1050-98, que sirven para obtener los resultados de determinadas mediciones de las propiedades físicas de los materiales acústicos. El software proporciona la información de la impedancia acústica del material, transmisibilidad y coeficiente de absorción en función de la frecuencia.

El sistema de Spectronics trabaja obteniendo una función de transferencia entre la relación de un par de micrófonos separados con alimentación de recepción independiente, que están montados al ras de la pared del tubo, mientras la muestra expone a un tipo de ruido blanco enviado desde el software, proviene de un amplificador que entrega la señal enviada de la interfaz hasta llegar a un driver pasivo montado al lado opuesto y final del tubo. Los materiales que son comúnmente utilizados para este tipo de aplicaciones son los porosos y fibrosos de varias densidades y varios espesores, en muestras de 35mm de diámetro para insertadas o montadas inicio del tubo.



Figura 17. Entorno de trabajo del programa ACUPRO de Spectronics.

Tomado de (Spectronics, 2014, p.08).

La Figura 17 muestra la plataforma virtual que se utiliza para visualizar el proceso de medición, el entorno de ACUPRO consta de la parte de configuración de parámetros para la medición al lado izquierdo de la pantalla, y la parte de resultados en gráficas al lado derecho. Para la utilización del programa se debe configurar dicha plataforma conforme a los manuales e instrucciones que dictan los desarrolladores de este.



### 3. Capítulo III: Metodología

En esta sección se han expuesto las diferentes etapas de procesamiento pertinentes para llevar a cabo la obtención y caracterización del panel acústico a base de la caña de maíz. Cada apartado conlleva la información necesaria para entender cada paso de elaboración, además de los resultados de un producto viable y alcanzable. Los equipos e instrumentación ocupados en este proyecto han sido necesarios para la elaboración del material acústico y la obtención de los resultados de las pruebas.

Debido a que se trata de un proyecto de caracterización y evaluación del coeficiente de absorción sonora, se ha considerado un tipo de metodología mixta que resalta la parte cualitativa que corresponde a la eficiencia relacionada con otros materiales. Por otro lado, la cuantitativa en función al valor de absorción conseguido en cada muestra de los diferentes resultados obtenidos.

Cada proceso se basa en guías y normativas que regulan la determinación del coeficiente de absorción acústica. Además de estar sujeto por la metodología y resultados obtenidos en la fibra de caña de azúcar (Arroyo & Méndez, 2018), pautas que servirán para la creación del material de caña de maíz y la comparación de resultados de absorción entre las mencionadas fibras.

Con respecto a lo anterior, las muestras para el análisis del coeficiente de absorción sonora se obtienen según el proceso establecido en la normativa UNE-EN ISO 10534-2, basado en dos métodos preliminares para medir las muestras. El primer método corresponde a la ubicación de dos micrófonos montados sobre un tubo de impedancia, y el segundo se basa en utilizar solo un micrófono interno y móvil.

Para este proyecto se ha considerado la primera metodología propuesta por la norma "ISO 10534-2", que utiliza un control del sistema digital, que trabaja mediante la conversión analógica/digital, en función de la recepción de los micrófonos montados en un tubo de impedancia y la excitación de ruido a través de un altavoz.

También esta metodología permite obtener otros parámetros como la impedancia acústica superficial, o la admitancia acústica superficial de las muestras, puesto que los cocientes de impedancia de un material de carácter absorbente tienen relación con propiedades físicas tales como la resistencia al flujo de aire, la porosidad y densidad.

Por consiguiente, se han elaborado muestras de 3.5 cm de diámetro, cada una con espesores de 6, 12 y 24mm obtenidas de los paneles, con la finalidad de adaptar al porta muestras propio del tubo de impedancia. En definitiva, con los valores y datos generados, se desarrolló una comparación de la absorción sonora y espesor de los paneles acústicos mediante el análisis y medición de las muestras correspondientes a cada panel.

En la siguiente Tabla 2 indica una conceptualización de las variables a utilizar para el desarrollo del trabajo.

Tabla 2.

*Metodología de aplicación del proyecto.*

<b>Nombre de la variable</b>	<b>Tipo</b>	<b>Mecanismo</b>
Grosor del panel acústico	Ordinal	Se realizarán comparaciones de absorción sonora en función al grosor del panel.
Densidad del panel	Cuantitativa	Se evalúa la muestra en función de la cantidad de mezcla de aglutinantes con el material crudo y se considera la densidad
Aglutinante	Nominal	Se compara el material acústico absorbente en

		relación con los diferentes tipos de materiales añadidos a la fibra natural
Porcentaje de componentes	Numérico	Se considera el porcentaje del material extra para la composición del material.
Absorción por frecuencia	Numérico	Mediante el programa digital propio del tubo de impedancia se obtienen los resultados de absorción en relación de la frecuencia.
Coefficiente de Absorción global	Numérico	Resultado general de absorción sonora en base a la muestra puesta en análisis.

### 3.1. Fibra vegetal de la caña de maíz

Se ha utilizado la caña de maíz del tipo “Chaucho mejorado” con código (*INIAP-122*), con características: grano amarillo, textura harinosa, porte bajo (1.20-1.40m), resistente al acame, precoz, buena calidad de grano; utilizado especialmente para choclo en las zonas templadas como la provincia de Imbabura. Sin embargo, en la actualidad existen muchos beneficios distintos a la alimentación, que pueden ser obtenidos de distintas partes de la planta de maíz. Es por lo que, dentro de la elaboración de los paneles acústicos se ha optado por utilizar el tallo como una idea para el tratamiento, elaboración de los paneles acústicos mediante su fibra y corteza (Morales, 2015).

### 3.2. Recolección de la materia prima

En el mes de abril se recolectaron las plantas de maíz, durante la etapa de maduración. Cabe señalar que en la actualidad este vegetal se puede adquirir para este objetivo en cualquier estación del año, debido al cambio climático, que involucra las fechas de siembra, la zona de sembrío, la altitud, la fertilización, la fumigación, entre otras.

Por lo tanto, se han escogido tallos con características del maíz tipo (*INIAP-122*), de color verde claro y morado, formado por una capa leñosa, dura y maciza con base cilíndrica, simple, recto, robusto y nudoso (8-38 nudos). Al recolectar este material se evidenciaron también entrenudos con medidas de 15 a 20cm y una altura general de las plantas de entre 1 a 3m. Es decir un material de un ciclo de cultivo de 125 a 210 días, desde su siembra hasta su maduración (Yáñez et al., 2013).

En la Figura 18 se muestra el proceso de ciclo de cultivo de esta planta.

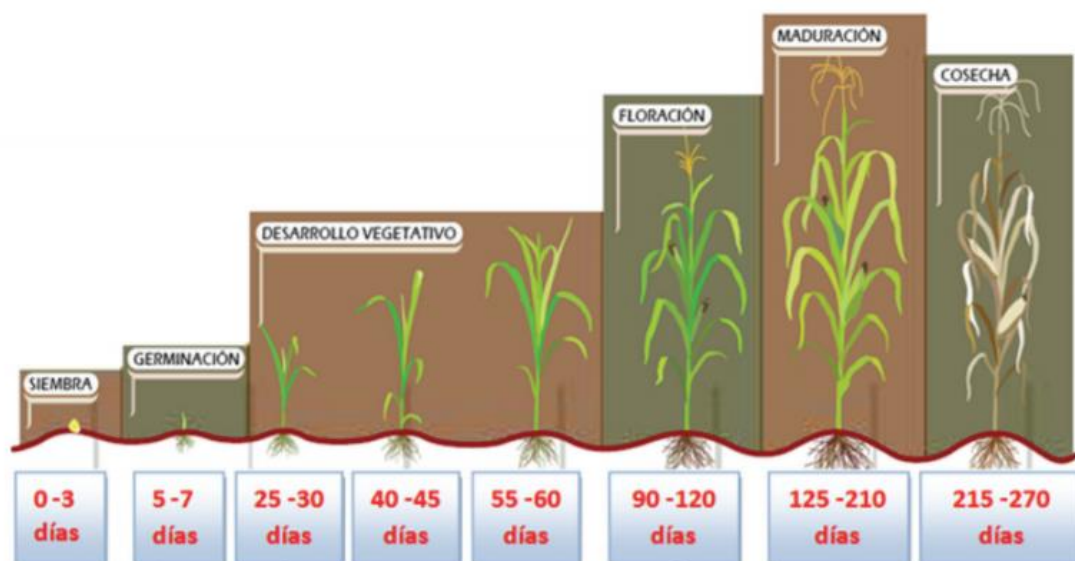


Figura 18. Etapas de desarrollo para el cultivo y cosecha del maíz.

Tomado de (Yáñez, 2013, p.10).

Conforme a lo mencionado, el lugar que ofreció la materia prima es un terreno de propiedad familiar que pertenece a la zona de la Sierra, específicamente en la provincia de Imbabura, Sector González Suárez.



*Figura 19.* Terreno de producción de maíz en estadio de floración y maduración en el sector González Suarez. Imbabura-Ecuador.

Previamente a la recolección de los tallos, se realizó un análisis de la muestra que sirvió para la evaluación y estado de las plantas de maíz. Dicho análisis determinó el grado de maduración para continuar con el proceso de trituración y secado de las fibras. Consecuentemente, se evidenció que en el terreno no todos los tallos están en el mismo estado de maduración, por lo que se tuvieron que elegir tallos que fluctúan entre los 2 a 2.5 cm de diámetro.

Una vez, seleccionadas las plantas se extrajo una cantidad de 56 tallos en el lapso de dos días consecutivos (Figura 20).



*Figura 20.* Recolección de tallos para proceso de trituración y tratamiento de la fibra.

### **3.3. Tratamiento de la materia prima**

Para esta etapa se obtuvo la cantidad de plantas necesaria para poder desarrollar el proceso de elaboración del material. Posteriormente se separaron del tallo, la raíz, las hojas, las flores y los frutos, innecesarios para este procedimiento. El tratamiento que se explica a continuación se realizó a todas las plantas seleccionadas.



*Figura 21.* Proceso de separación de las partes innecesarias de la planta.

Con los tallos obtenidos, se realizó consecutivamente la fase de trituración, es decir se pasaron los tallos por la máquina eléctrica de extracción de jugo de caña de azúcar. En este proceso se tuvieron que cortar y dividir cada uno de los tallos en partes pequeñas para que pudieran ingresar en la máquina y se pudiera extraer todo el jugo innecesario de la planta, con el fin de trabajar solamente con la corteza y la fibra.



*Figura 22.* Proceso de trituración en maquina extractora del jugo de caña de azúcar.

Seguidamente, se colocó la fibra triturada a la intemperie, para dejarla secar durante un lapso de 2 días. Cabe destacar que existe otra forma alternativa para el secado de las fibras, como es el uso de un horno industrial. Pero debido a que no se cuenta con el mismo, se optó por trabajar con la primera opción.



*Figura 23.* Proceso de secado de la fibra triturada expuesta a la intemperie por un lapso de dos días (48Hrs).

#### **3.4. Prueba de secado de las fibras, intemperie vs horno.**

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en un material acústico, compuesto por fibras, es su durabilidad. En este caso se pudo evidenciar que, mediante la etapa de secado a temperatura ambiente la fibra del tallo de maíz se contrajo hasta obtener filamentos frágiles al manipularlos. Generalmente esto sucede cuando se deja de 6 meses a 1 año de secado.



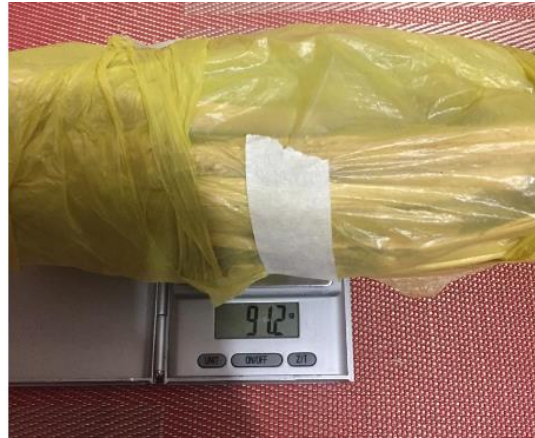
Seguidamente, se evaluó la pérdida de peso de la fibra siguiendo el tratamiento utilizado por Ali et al., (2018) denominado “Tratamiento hidrofóbico de las fibras naturales y sus compuestos”. Este estudio se encarga de examinar diferentes tratamientos usados para la reducción de absorción de la humedad en fibras naturales mediante la degradación de las partículas. En estos estudios se usa el secado a través de hornos con temperaturas controladas,

En el citado estudio, se introduce la fibra en un horno a una temperatura de 60° C durante unas 6 horas, para seguidamente evaluar la pérdida de peso en gramos, comparando de esta manera el peso inicial con el peso final obtenido del secado en el horno. Esto sirvió para comparar el estado de secado entre la fibra expuesta a la intemperie y la expuesta al horno a través de un procedimiento controlado (Ali et al., 2018).

Las fibras utilizadas para la prueba tienen un peso inicial de 95.5 gramo, y al exponerlas al horno durante un tiempo y temperatura indicada, el peso se reduce a 91.2 gramos. Es decir, se produce una diferencia de 4.3 gramos del peso inicial, marcando un porcentaje de reducción de 4.5%.



*Figura 24.* Exposición inicial de la fibra de caña de maíz a temperatura ambiente.



*Figura 25.* Fibra expuesta al horno a 60°C durante 6 horas.

### **3.5. Aglutinantes barro, goma blanca, yeso.**

La utilización de distintos aglutinantes como el yeso, el barro y la goma, contribuyeron a aumentar la durabilidad del material fibroso y la funcionalidad del panel. La selección de estos tres tipos de aglutinantes presenta dos ventajas fundamentales: la primera que son materiales de fácil alcance, y la segunda que permiten desarrollar artesanalmente esta composición.

El motivo de elegir los citados aglomerantes es poder realizar una comparación de la absorción de la caña de azúcar y la caña de maíz, hecho que se hace posible gracias al trabajo sobre la caña de azúcar por Arroyo & Méndez, (2018).

### **3.6. Procedimiento de elaboración de paneles**

Partiendo del secado de las fibras que fueron expuestas a temperatura ambiente, se procedió a cortar cada uno de los tallos secos y triturarlos a un tamaño de 5mm x 5mm aproximadamente; este proceso se realizó según el apartado denominado "Propuesta de tableros decorativos: sistema de prensado y encolado", extraído de un trabajo de tesis para la elaboración de tableros realizados con el bagazo de caña de azúcar (Jiménez & Ochoa, 2014).



*Figura 26.* Proceso de corte milimetrado de la fibra para pasar al cedazo metálico.

Seguidamente, se recolectó toda la fibra cortada para dar paso a la tamización de esta, a través de un cedazo metálico, por donde se filtraron los residuos que posteriormente se utilizaron para distribuirlas en cada panel con sus respectivos aglutinantes. Esta técnica se repitió varias veces hasta obtener la cantidad necesaria para realizar todos los paneles proyectados.

La Figura 27, muestra el proceso de tamizado de la fibra de caña de maíz, mediante la utilización de un cedazo metálico elaborado de forma artesanal.



*Figura 27.* Proceso de tamizado de la fibra del tallo de maíz

En base a la metodología de Jiménez & Ochoa, (2014), se procedió a la construcción de moldes de madera, tamaño A4 (27,7cm x 21cm), con el propósito de depositar en ellos las fibras mezcladas con sus respectivos aglutinantes y prensarlos con un peso muerto, durante dos días. De este modo se obtuvieron paneles con una relación de 3:1. Es decir que, por cada tres partes de fibra se incluyó una de aglutinante.



*Figura 28.* Moldes para los paneles de la fibra de caña de maíz. 6, 12 y 24mm.

Considerando que el aglutinante de goma lleva una parte líquida por su composición, para este tipo de muestras se utilizó una relación de 2:1.

Para el caso de los aglomerantes de yeso y barro, se incorporó un porcentaje de 4% a 6% de agua, con respecto a la cantidad de estos aglutinantes, para que sus partículas se compacten y se puedan adherir a la fibra.

En la siguiente imagen (Figura 29), se puede apreciar la división del panel para colocar los porcentajes de fibra y aglomerante para su mezcla.



*Figura 29.* Proceso de elaboración de aglutinante de goma y fibra caña de maíz.

Una vez formados los paneles con el material propuesto, se extrajeron muestras que se depositaron en moldes de madera con orificios circulares (35mm de diámetro). Con dichas muestras se realizaron las mediciones y análisis en el tubo de impedancia. Cabe mencionar que la profundidad de cada molde de los paneles es equivalente a los moldes de las muestras, adquiriendo de esta manera espesores de 6,12 y 24mm del material acústico.

A continuación, se presenta una tabla que informa el peso de cada uno de los compuestos del panel, según la relación propuesta.

Tabla 3.

*Cantidades de Bagazo de caña de maíz con aglutinante de barro.*

Bagazo de maíz-barro (3:1)			
espesor (mm)	fibra (gr)	aglutinante (gr)	agua (gr)
6	45	65	30
12	65	95	50
24	180	165	110

Tabla 4.

*Cantidades de bagazo de caña de maíz con aglutinante de goma.*

Bagazo de maíz-goma líquida (2:1)			
espesor (mm)	fibra (gr)	aglutinante (gr)	agua (gr)
6	50	125	0
12	70,2	250	0
24	86,5	500	0

Tabla 5.

*Cantidades de bagazo de caña de maíz con aglutinante yeso.*

Bagazo de maíz-yeso (3:1)			
espesor (mm)	fibra (gr)	aglutinante (gr)	agua (gr)
6	45	72	90
12	65	122	130
24	180	225	200



*Figura 30.* Resultado de los paneles de caña de maíz con sus respectivos aglutinantes (barro, goma y yeso).

### **3.6.1. Costos de los materiales utilizados para la elaboración de paneles**

Cabe indicar que, para la elaboración de este tipo de paneles tanto el precio como su elaboración fueron bajos y de fácil ejecución. Esto en comparación con los materiales sintéticos, mismos suelen ser más costosos y que necesitan de un proceso de industrialización para su desarrollo en el área acústica.

En la siguiente Tabla 6 de presupuesto se detallan los materiales y costos utilizados para la composición de los paneles.

Tabla 6.

*Presupuesto para la elaboración de los paneles acústicos de caña de maíz.*

<b>Cantidad</b>	<b>Material</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor</b>
9	Tableros molde Carpintería	USD 2,00	USD 18,00
1	Cedazo Metálico Carpintería	USD 5,00	USD 5,00
3	Libras de yeso	USD 0,60	USD 1,80
3	Libras de Barro	USD 0,40	USD 1,20
2	Tarros de Goma Blanca	USD 3,50	USD 7,00
2	Pares de guantes	USD 1,00	USD 2,00
1	Balanza digital de peso	USD 15,00	USD 15,00
		IVA 12%	USD 6,00
		<b>TOTAL</b>	<b>USD 56,00</b>

Como se puede observar en la Tabla 6, el valor total de la adquisición de los materiales para la ejecución del proyecto fue de 56 dólares. En relación con la materia prima, cabe resaltar que fue gratuita, gracias a la posibilidad de obtener las plantas de maíz de un terreno de propiedad familiar.



### 3.7. Procedimiento de medición y caracterización de las muestras

Dentro de este apartado, se detalla la forma en la que se desarrolló la fase de medición para obtener los coeficientes de absorción del material, con sus respectivos aglutinantes. Cabe mencionar que en esta operación se realizaron seis mediciones para cada muestra, en dos días distintos.

Además, se realizó una medición de prueba para evaluar el estado de los equipos y su cadena de conexión.

Mediante la utilización de Excel se validan los datos de absorción acústica obtenidos en la etapa de medición.

Las muestras con los distintos aglutinantes y espesores utilizadas para medir el coeficiente de absorción se especifican en la Figura 31.

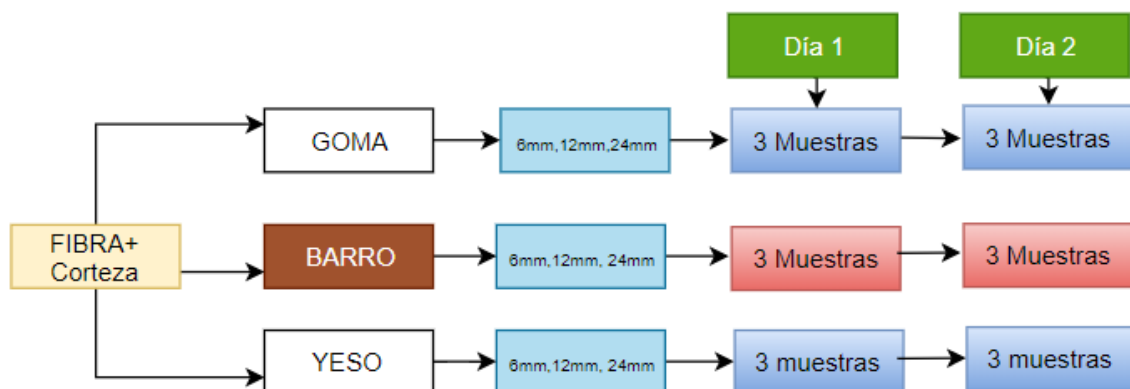


Figura 31. Diagrama de flujo para las muestras medidas en el Tubo de Kundt en un día.

Las muestras analizadas arrojaron las siguientes composiciones: bagazo de caña de maíz-barro, bagazo de caña de maíz-goma y bagazo de caña de maíz-yeso. Cada una de estas configuraciones se separaron en tres espesores diferentes para ejecutar una comparativa entre sí y también con los resultados obtenidos de la caña de azúcar.

Las proporciones de los materiales utilizados para el desarrollo de los paneles se especifican en las siguientes tablas.

Tabla 7.

*Peso de las muestras obtenidas para el proceso de medición de absorción*

<b>Peso de las muestras para la medición</b>			
<b>Espesor</b>	<b>Aglutinante</b>		
	<b>Barro</b>	<b>goma</b>	<b>Yeso</b>
6mm	5gr	2,5gr	7,0gr
12mm	13gr	5gr	7,5gr
24mm	13,5gr	8,8gr	16,5gr

En la Figura 32 se puede apreciar las muestras físicas obtenidas a partir del proceso de elaboración de los paneles. Dichas muestras fueron colocadas en el tubo de impedancia para obtener los valores de absorción correspondientes a cada tipo de panel.



*Figura 32. Muestras para la medición en el tubo de impedancia (bagazo maíz-barro, bagazo maíz-goma y bagazo maíz-yeso).*

### **3.7.1. Diagrama de interconexión para los instrumentos de medición**

El diagrama de conexión para el proceso de medición es de vital importancia para una correcta realización de las mediciones. Antes de ejecutar cualquier conexión, es necesario conocer las especificaciones técnicas los equipos y su

función dentro de la cadena electroacústica, y así evitar percances en el momento del montaje.

En la Tabla 8 se indica el equipo necesario para poder realizar la medición.

Tabla 8.

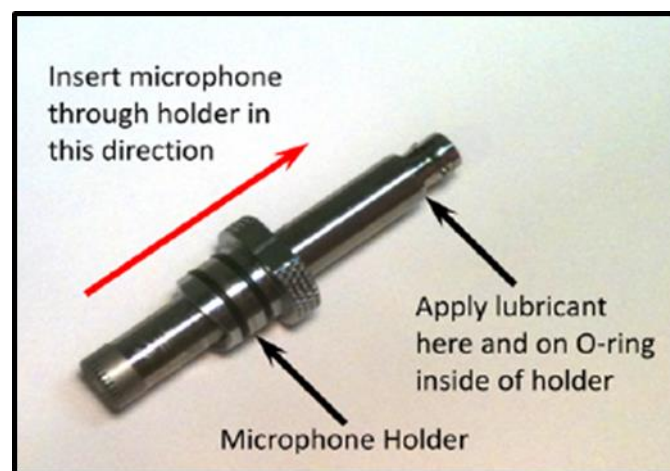
*Lista de dispositivos para poder interconectar en el montaje de medición de absorción.*

*	Tubo ACUPRO con soportes y tornillos de nivelación.
*	Cable USB 2.0
*	Amplificador de Audio Pyle pta2
*	Altavoz pasivo JBL 2426H
*	Soportes para micrófono de 1/2 pulgada (2)
*	Porta muestras con émbolo.
*	Cortador de muestras
*	Tornillos moleteados para sujetar el soporte de muestras (3)
*	Software ACUPRO
*	Manual del usuario de ACUPRO.
*	Micrófonos de precisión Grass
*	Interface Data Translación dt9837a

*	Cables BNC
*	Cable BNC to RCA

Para la conexión de la cadena electroacústica se empieza con el montaje, por lo que se deberá contar con todos los instrumentos que se muestran en la tabla 8. El principal instrumento de interconexión para todos los dispositivos la interfaz digital/análoga “DT9837A”, que integra las entradas y salidas que se distribuyen hacia los diferentes puntos de conexión.

En segundo lugar, se fijan micrófonos a los soportes específicos con los tornillos de nivelación. Para ello se debe utilizar una llave hexagonal que permita ajustar y desajustar la entrada del micrófono en el soporte, tal como se muestra en la siguiente ilustración.



*Figura 33.* Configuración de adaptación de los micrófonos Gras con los soportes.

Tomado de (Spectronics, 2014, p.05).

Una vez insertado los micrófonos en la posición del tubo de Kundt, se procedió a conectar en la interfaz, a través de los cables tipo “BNC to BNC”, que por lo general se insertan en las entradas A0 y A1 y si se utilizan otras entradas como A3 o A4 se deberán configurar en el programa ACUPRO.

Seguidamente, se conectó un cable USB 2.0 a la entrada del computador en el que estaba instalado el programa ACUPRO.

Posteriormente, se conectó la salida de la señal de la interfaz “*Signal Output*” en la entrada de un amplificador de potencia, mediante un cable de tipo BNC a RCA a una de las entradas auxiliares. De esta manera, se reguló en el amplificador el nivel de potencia con el control de un multímetro, evitando que sobre pasen los 3V rms.

Finalmente, se desajustó el porta muestras para colocar el material absorbente que se va a evaluar, para luego volverlo a ajustar en el tubo de impedancia y poder ejecutar la medición.

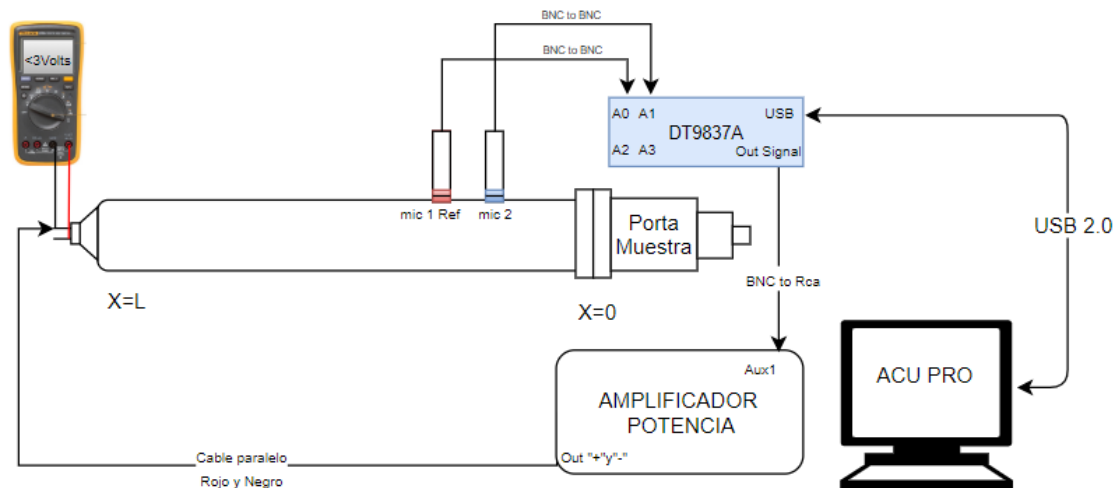


Figura 34. Diagrama de interconexión de dispositivos para el proceso de medición de absorción de materiales.

### 3.7.2. Procedimiento de validación de los datos obtenidos para cada muestra en Excel.

A continuación, mediante el uso de (Microsoft Excel), cada archivo es convertido en una hoja de cálculo, que reflejan los datos y los resultados de la medición, en donde para los coeficientes de absorción se utilizó la respuesta promedio de 1/3 de octava, ubicados al final de la hoja de cálculo.

Luego de obtener todos los coeficientes de absorción en 1/3 de octava de todas las mediciones, se importaron los datos para organizarlos en un solo archivo y poder realizar las operaciones acústicas pertinentes, que muestran los resultados teóricos y gráficos.

Los valores de absorción acústica, importados hacia el documento de Excel (.xlsx), se dividieron en tres hojas de cálculo: bagazo-barro, bagazo-goma, bagazo-yeso, para organizar y manipular con más eficiencia los datos por secciones, que describieron los resultados concretos y gráficos, de acuerdo con cada tipo de aglutinante combinado con la muestra.

Cada hoja de cálculo contiene los resultados de absorción en 1/3 de octava desde 100 Hz hasta 5000 Hz, tabulados por cada tipo de espesor 6, 12 y 24mm, los que se organizaron en dos fechas, para un total de 6 medidas por cada tipo de muestra que corresponde a cada combinación de “fibra-aglutinante” ver Figura 31 (diagrama de flujo).

Dentro de la presentación de los datos, se obtuvo un promedio aritmético de las 6 mediciones por cada tipo de muestra, que permitan observar los valores de absorción en función de la frecuencia mediante un gráfico de barras, Este gráfico mostraba la variación exacta de los resultados para los distintos espesores. Este proceso de presentación se utilizó para todos los casos de combinación “fibra-aglutinante”.

Cabe señalar que los resultados generados mediante la etapa de validación fueron realizados en base a las normas UNE-EN\_ISO 10534-2 y UNE-EN\_ISO\_11654=1998, para obtener tanto los niveles globales de absorción como los niveles de absorción por frecuencia, de acuerdo con los diferentes tipos de muestra.

A continuación, se indica un ejemplo de cómo se realizó el promedio en la plataforma de Excel.

	Frecuencia Hz	6mm $\alpha$ med	12mm $\alpha$ med	24mm $\alpha$ med
<b>BARRO</b>	100	0,17	0,27	0,19
	125	0,12	0,10	0,20
	160	0,17	0,10	0,11
	200	0,06	0,07	0,09
	250	0,13	0,13	0,15
	315	0,14	0,14	0,18
	400	0,11	0,16	0,20
	500	0,12	0,18	0,23
	630	0,13	0,19	0,30
	800	0,14	0,21	0,42
	1000	0,16	0,22	0,62
	1250	0,20	0,25	0,78
	1600	0,28	0,31	0,65
	2000	0,40	0,39	0,47
	2500	0,58	0,42	0,39
	3150	0,65	0,42	0,39
4000	0,52	0,37	0,41	
5000	0,40	0,37	0,48	

Figura 35. Ejemplo de validación de datos promediado de las mediciones de ensayo de absorción Bagazo de caña de maíz-barro.

De acuerdo con la Norma UNE- EN\_ISO 11654 se generó un valor de absorción global " $\alpha_w$ ", Alpha w determinado mediante una curva de desviación y a una curva de referencia. Los valores de la curva de desplazamiento representan el resultado de la operación obtenida por  $\alpha_{pi}$ , que varía desde la frecuencia de 125 Hz hasta los 4 kHz, mientras que los valores para la curva de referencia se obtuvieron de la norma mencionada.

Seguidamente, se obtuvo la absorción acústica ponderada  $\alpha_w$ , obtenida como el valor de la curva de referencia desplazada a 500 Hz. Para este caso se ha realizado un mecanismo de traslación de la curva de referencia por pasos de 0.05. Consecutivamente se produjo una desviación desfavorable a a la frecuencia a la que se le aplicó la condición, menor o igual a 0.1 para la suma desfavorable.

En este procedimiento, se debe señalar entre paréntesis un indicador de forma L, M o H junto al valor de absorción global, siempre y cuando exista un coeficiente de absorción acústica práctico  $\alpha_{pi}$  que supere el valor de desplazamiento en 0.25. Estos indicadores describen el resultado del contenido de absorción para un grupo de frecuencias *Low, Mid, o High*,

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo se obtuvo el resultado global de absorción.

COEFICIENTE GLOBAL DEL BAGAZO - GOMA 12mm							
Frecuencia	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 KHz	2 KHz	4 KHz	VALOR GLOBAL
	0,16	0,10	0,12	0,22	0,66	0,59	0,2
Abs Redond	0,15	0,10	0,10	0,20	0,65	0,60	
Curva de Ref		0,8	1	1	1	0,9	DESVIACION
Curva Despla	-0,8	0	0,2	0,2	0,2	0,1	0,8
Desfavorable	0,95	0,10	-0,10	0,00	0,45	0,50	
Suma Desfav	0	0	0,1	0	0	0	0,1

*Figura 36.* Ejemplo de organización de los datos para obtener el valor de absorción global bagazo-goma 6mm de acuerdo con la norma UNE EN ISO 11654.

Una vez obtenido todos los resultados correspondientes al cálculo de absorción, también se ha evaluado el cálculo de incertidumbre de las mediciones realizadas a través del documento de “Evaluación de datos de Medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida”. Este proceso conlleva a determinar la variación existente entre las repeticiones que se realizaron al momento de medir cada muestra, que pueden ser provocados a causa de las condiciones acústicas y de calibración. Cabe destacar que a cada muestra se ha realizado un total de 6 mediciones en un lapso de 2 días de ensayo. Además, para la evaluación se usará un cálculo de incertidumbre “Tipo A”, en donde se requiere un cálculo previo de la varianza.

Finalmente, a ese resultado se le multiplica por un factor de 100, para comprender los resultados en términos porcentuales.

## 4. Capítulo IV: Resultados y Análisis

### 4.1. Descripción de resultados

Para el análisis de los resultados de la absorción acústica de la fibra de caña de maíz, se aplicó la metodología descrita en las normas UNE-EN\_ ISO 10534-2, UNE-EN\_ ISO 11654 y la “Guía para la expresión de Incertidumbre de medida”.



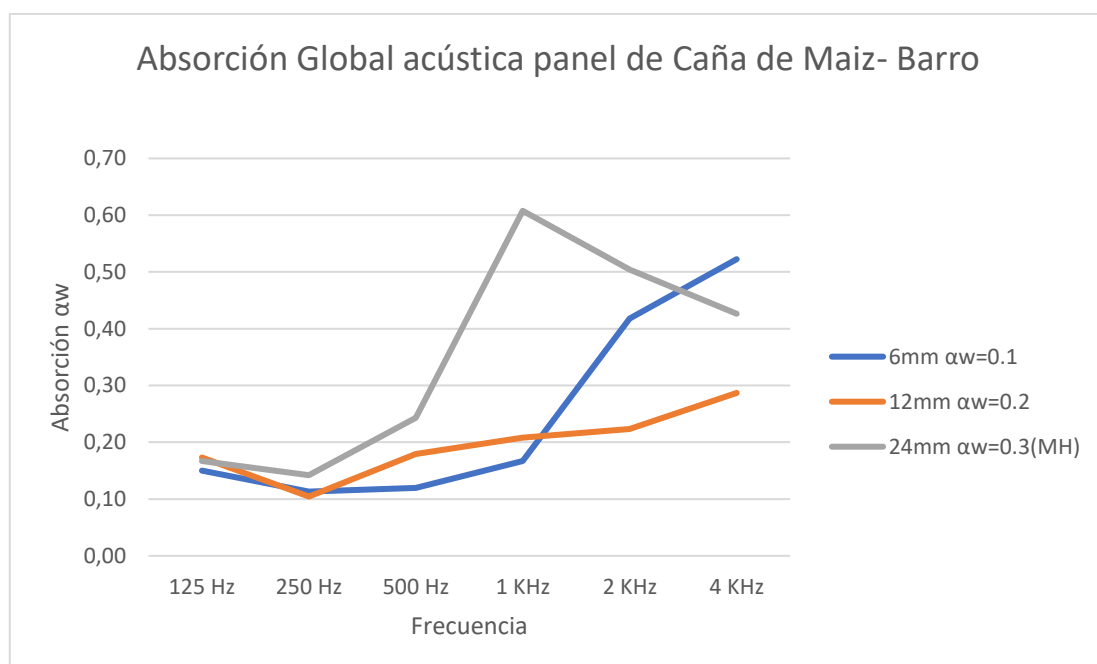
En primer lugar, se indicó el resultado del coeficiente global de absorción conforme a la normativa “UNE- EN\_ISO 11654”, y se realizó una gráfica con el resultado de la curva de absorción y frecuencia para cada uno de los tipos de muestras desarrolladas.

En segundo lugar, se establecieron los datos del cálculo de incertidumbre, para descartar errores desfavorables a la medida y evaluar la repetibilidad de las 6 mediciones que se realizaron en los dos días de ensayo.

Finalmente, mediante el comportamiento de las curvas de absorción, se compararon los resultados de espesor entre las fibras de caña de maíz y la caña de azúcar.

## 4.2. Fibra de caña de maíz con barro

### 4.2.1. Valores globales de absorción de caña de maíz-barro



*Figura 37.* Comparación del resultado de coeficiente global de absorción acústica para el panel de caña de maíz—barro.

En la Figura 37 se presentan los resultados de absorción global en comparación con la frecuencia desde los 125 Hz a 4 kHz, Para este caso se utilizó la

comparación de las curvas de 6mm, 12mm y 24mm, para la composición de fibra y aglutinante de barro.

El resultado de la gráfica indica un comportamiento ascendente de las curvas de 6mm y 12mm. La muestra de 24mm alcanza una máxima absorción de 0.61 en la frecuencia de 1 kHz. Seguidamente la curva va decreciendo hasta 4 KHz con un valor de 0.43. Esto implica que la muestra de 24mm tiene un carácter más selectivo en medias y altas frecuencias.

Por consiguiente, el valor de absorción global para la muestra de 6mm es de 0.1 con una mayor absorción en altas frecuencias, mientras que para la de 12mm su valor es de 0.2, presentando solo una pequeña variación de absorción entre medias y altas frecuencias. Por último, para la de 24mm el valor de absorción global es de 0.3 con indicador de forma (MH), destacándose como la mejor muestra absorbente en esta composición y además es la única que tiene indicador de forma.

#### 4.2.2. Cálculo de la incertidumbre de caña de maíz-barro

Tabla 9.

*Incertidumbre de las mediciones para las muestras de Caña de maíz- Barro.*

<b>Frecuencia</b>	<b>Incert</b>	<b>Incert</b>	<b>Incert</b>
<b>Hz</b>	<b>6mm</b>	<b>12mm</b>	<b>24mm</b>
<b>100</b>	0,0124	0,0316	0,0111
<b>125</b>	0,0235	0,0186	0,0310
<b>160</b>	0,0259	0,0129	0,0119
<b>200</b>	0,0079	0,0097	0,0102
<b>250</b>	0,0151	0,0124	0,0177
<b>315</b>	0,0162	0,0089	0,0187
<b>400</b>	0,0166	0,0182	0,0304
<b>500</b>	0,0187	0,0204	0,0306
<b>630</b>	0,0146	0,0178	0,0299

<b>800</b>	0,0108	0,0155	0,0297
<b>1000</b>	0,0064	0,0119	0,0301
<b>1250</b>	0,0015	0,0130	0,0158
<b>1600</b>	0,0005	0,0217	0,0154
<b>2000</b>	0,0111	0,0381	0,0188
<b>2500</b>	0,0355	0,0513	0,0078
<b>3150</b>	0,0394	0,0529	0,0055
<b>4000</b>	0,0058	0,0276	0,0032
<b>5000</b>	0,0057	0,0060	0,0034

---

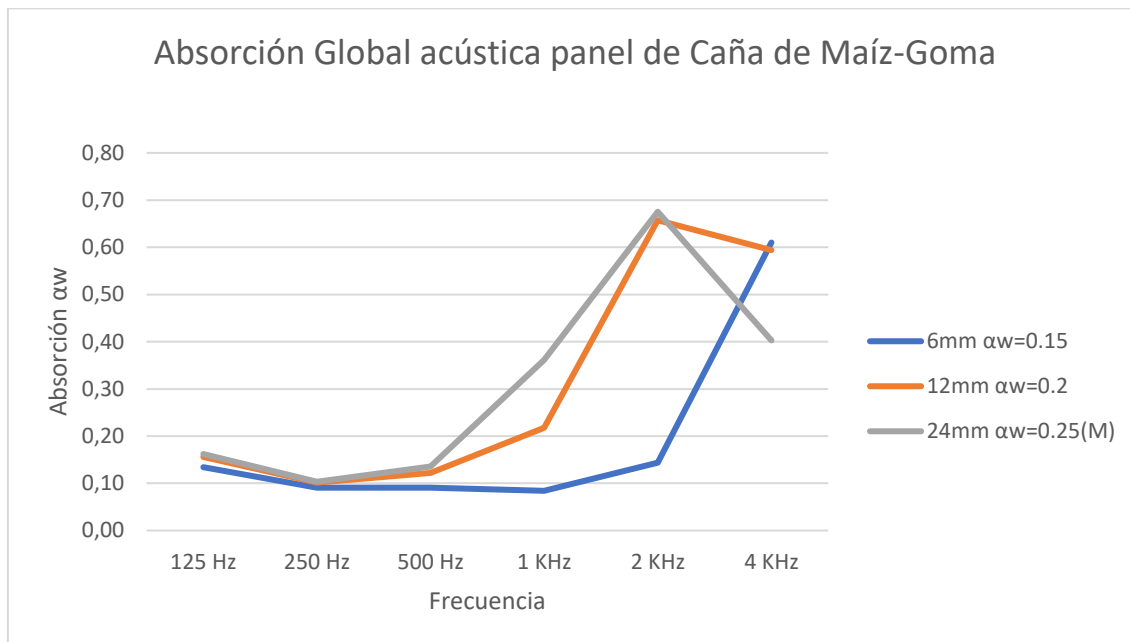
La Tabla 9 proporciona los datos de incertidumbre para las muestras de 6mm, 12mm y 24m de la mezcla de la fibra de caña de maíz y el barro.

Para la muestra de 6mm, en la frecuencia de 1600 Hz se obtiene un valor mínimo de 0.0005 y como máximo un valor de 0.0394- Para 3150 Hz el porcentaje de incertidumbre ascendió a 3.4%.

Para la muestra de 12mm a 5000 Hz, el valor mínimo es de 0.006 y el máximo de 0.0529 con un grado de incertidumbre porcentual de 5.29%. Finalmente, para la muestra de 24mm, el valor mínimo es de 0.0032 y el máximo de 0.0310 para la frecuencia de 125 Hz, es decir 3,1% de incertidumbre. En definitiva, las medidas realizadas en el panel de 12mm muestran un grado de incertidumbre baja respecto a los demás.

### 4.3. Fibra de caña de maíz con goma blanca

#### 4.3.1. Valores globales de absorción caña de maíz – goma



*Figura 38.* Comparación del resultado de coeficiente global de absorción acústica para el panel de caña de maíz—goma.

En la Figura 38, se muestra la interacción y diferencia del comportamiento de las tres muestras del tipo de aglutinante-goma, que comienza desde los 500 Hz. Los resultados del valor global de absorción indican que para la curva de 6mm es de 0.15. Cabe indicar que no utiliza un indicador de forma debido a su valor inferior a los 0.25, a pesar de lo señalado, esta muestra absorbe más para altas frecuencias, alcanzando un máximo nivel de coeficiente de absorción de 0.6 a partir de los 2 kHz.

Por otra parte, para el caso de la curva de 12mm su máximo valor de absorción global es de 0.7, para la frecuencia de 2 kHz. Este valor indica una mayor absorción para medias y altas frecuencias. Finalmente, se observa que la curva de 12mm y la de 24mm tienen el mismo valor de 0.7, en la frecuencia de 2 kHz,

a partir de la cual descienden en forma dispersa, siendo la de 24mm la de mayor descenso con un valor global de 0.25(M).

#### 4.3.2. Cálculo de la incertidumbre de caña de maíz-goma

Tabla 10.

*Incertidumbre de las mediciones para las muestras de caña de maíz-goma.*

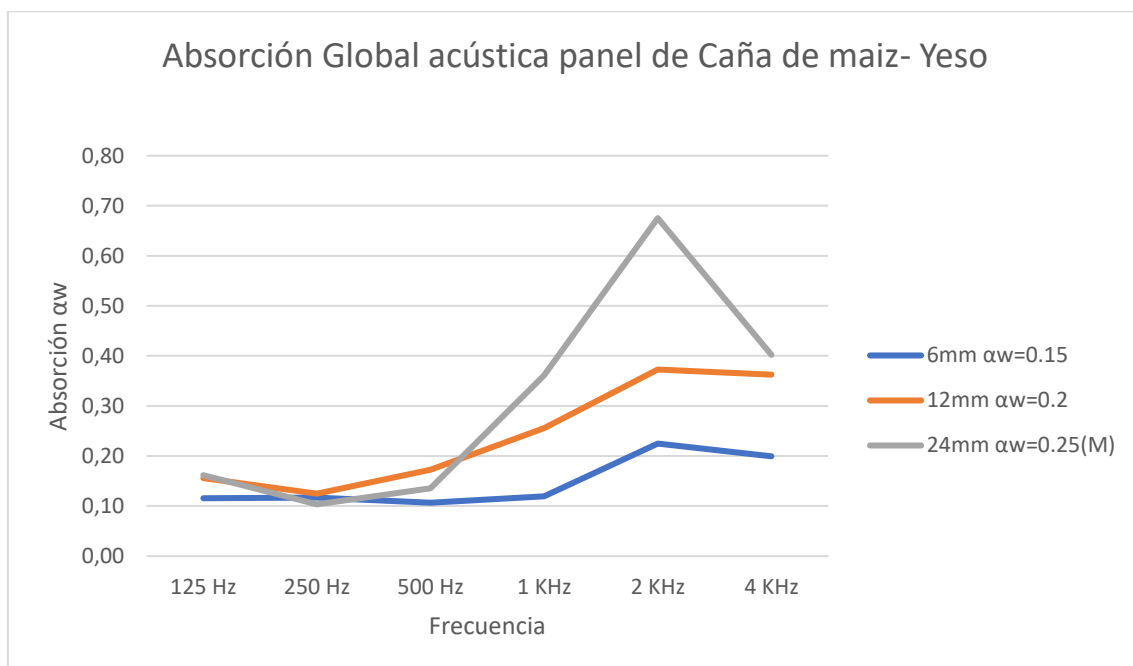
<b>Frecuencia</b>	<b>Incert</b>	<b>Incert</b>	<b>Incert</b>
<b>Hz</b>	<b>6mm</b>	<b>12mm</b>	<b>24mm</b>
100	0,0296	0,0177	0,0384
125	0,0206	0,0246	0,0281
160	0,0212	0,0166	0,0161
200	0,0108	0,0107	0,0084
250	0,0124	0,0104	0,0225
315	0,0113	0,0089	0,0118
400	0,0172	0,0170	0,0174
500	0,0169	0,0196	0,0169
630	0,0137	0,0179	0,0136
800	0,0082	0,0166	0,0097
1000	0,0041	0,0195	0,0063
1250	0,0001	0,0269	0,0023
1600	0,0021	0,0416	0,0016
2000	0,0021	0,0270	0,0013
2500	0,0023	0,0360	0,0003
3150	0,0026	0,0216	0,0031
4000	0,0141	0,0055	0,0181
5000	0,0369	0,0020	0,0018

En la tabla 10 se consideran rangos de incertidumbre entre 0.0001 a 0.369, alcanzados en las 6 mediciones del panel de 6mm, destacando la frecuencia de 500 Hz con el 3.7%. Por otro lado, para el panel de 12mm se evidencian variantes

de la incertidumbre de 0.0020 a 0.416, siendo el valor máximo en 1600 Hz marcando el 4.2%. Por último, para el panel de 24mm, se han obtenido variaciones de incertidumbre que oscilan entre 0.0003 a 0.0384 marcando un porcentaje de 3.8%.

#### 4.4. Fibra de caña de maíz con yeso.

##### 4.4.1. Valores globales de absorción de caña de maíz – yeso



*Figura 39.* Comparación del resultado de coeficiente global de absorción acústica para el panel de caña de maíz—yeso.

Con respecto a la gráfica de la Figura 39, la interacción entre las curvas comienza aproximadamente desde los 250 Hz. Para este caso cabe destacar que las curvas tanto de 12mm y 6mm son similares, pero con diferente valor de absorción. Sin embargo, en esta demostración la curva de 24mm tiene un comportamiento equivalente a las curvas obtenidas los apartados (4.2.1 y 4.3.1).

En los datos que corresponden al coeficiente de absorción sonora global del bagazo-yeso, para el espesor de 6mm se obtuvo un valor de 0.15, a diferencia de la muestra de 12mm se registró un valor global de 0.2 dando mayor relevancia

a las frecuencias medias y altas. Para finalizar, en la muestra de 24mm se obtuvo un valor de 0.25(M).

#### 4.4.2. Cálculo de la incertidumbre caña de maíz-yeso

Tabla 11.

*Incertidumbre de las mediciones para las muestras de Caña de maíz-Yeso*

<b>Frecuencia</b>	<b>Incert</b>	<b>Incert</b>	<b>Incert</b>
<b>Hz</b>	<b>6mm</b>	<b>12mm</b>	<b>24mm</b>
<b>100</b>	0,0163	0,0180	0,0088
<b>125</b>	0,0197	0,0302	0,0295
<b>160</b>	0,0167	0,0164	0,0241
<b>200</b>	0,0086	0,0097	0,0118
<b>250</b>	0,0229	0,0169	0,0141
<b>315</b>	0,0140	0,0190	0,0171
<b>400</b>	0,0122	0,0226	0,0181
<b>500</b>	0,0134	0,0245	0,0177
<b>630</b>	0,0110	0,0201	0,0147
<b>800</b>	0,0071	0,0162	0,0156
<b>1000</b>	0,0043	0,0115	0,0121
<b>1250</b>	0,0009	0,0052	0,0042
<b>1600</b>	0,0006	0,0013	0,0035
<b>2000</b>	0,0028	0,0013	0,0042
<b>2500</b>	0,0049	0,0079	0,0039
<b>3150</b>	0,0049	0,0081	0,0079
<b>4000</b>	0,0050	0,0012	0,0037
<b>5000</b>	0,0091	0,0048	0,0077

En la Tabla 11, considerando las 6 mediciones para los tres tipos de espesores, los rangos de incertidumbre para la muestra de 6mm tienen una variación de 0.0006 a 0.0229 como resultado del ensayo, realizando la frecuencia de 250 Hz al respecto del 2.3%. Seguidamente en la muestra de 12mm se detallan rangos

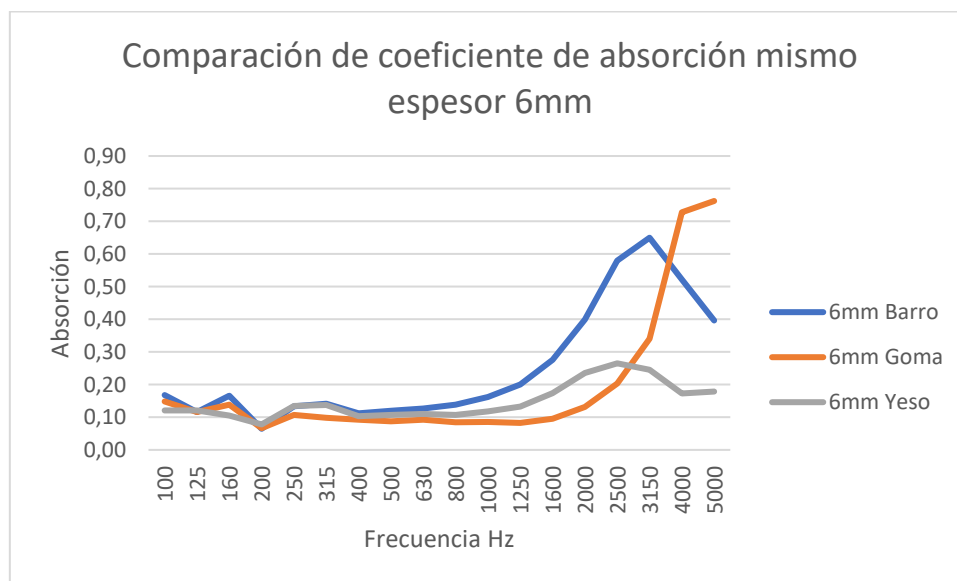
de incertidumbre de entre 0.0012 a 0.0302 para la frecuencia de 125 Hz en 3%. Finalmente, en relación con la muestra de 24mm, el rango de incertidumbre es de 0.0035 a 0.0295 a la frecuencia de 125 Hz con un porcentaje de 2.9, En definitiva, se estima la variación repetitiva entre las mediciones no ha sido afectada en este proceso, debido a sus valores de incertidumbre son muy bajos.

#### 4.5. Análisis de resultados de las muestras del mismo espesor con diferente aglutinante.

Dentro del estudio de los resultados, se ha optado por estudiar del tipo de aglutinante en el coeficiente de absorción acústica de las muestras.

A continuación, se observan, las gráficas que corresponden a las diferentes combinaciones con espesores de 6, 12, y 24mm.

##### 4.5.1. Comparación de las muestras 6mm



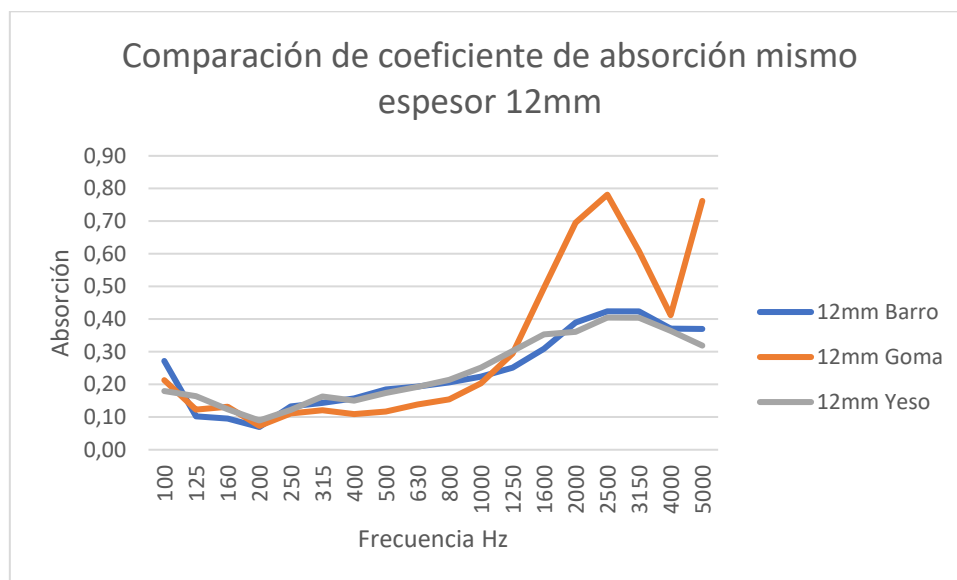
*Figura 40.* Comparación de absorción sonora promedio entre diferentes aglutinantes con el mismo espesor 6mm.

La Figura 40, establece la comparativa entre los tres tipos de aglutinantes, a partir de 400 Hz se observa que cada curva tiene un camino diferente. En el barro, se expresa un rendimiento ascendente desde la frecuencia de 1250 Hz a 500 Hz, misma que alcanza su máximo valor de 0.6 de coeficiente de absorción



en 3150 Hz. Por otra parte, para la curva de goma, el resultado es mejor desde 3150 Hz a 5000 Hz con un valor de 0.8. Finalmente, para el tipo de yeso el máximo valor es de 0.27 en la frecuencia en 2500 Hz. Siendo este último espesor el que menos aporta a la absorción con este tipo de espesor.

#### 4.5.2. Comparación de las muestras 12mm

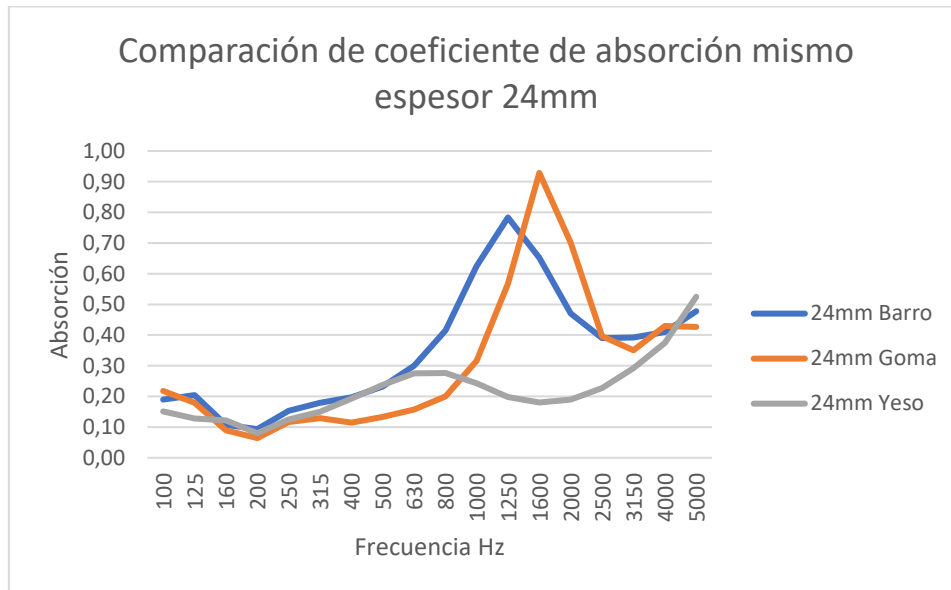


*Figura 41.* Comparación de absorción sonora promedio entre diferentes aglutinantes con el mismo espesor 12mm.

La Figura 41, muestra una comparación del espesor de 12mm. En el caso del yeso y barro, se puede apreciar que no existe diferencia en los valores de absorción. Estas curvas indican que tanto el comportamiento como en la respuesta en absorción, el resultado de estas dos curvas indican que el máximo nivel alcanzado es de 0.40 en 3150 Hz, siendo uno de los resultados más aceptables, debido a que la capacidad de absorber aumenta en función de la frecuencia a partir de los 200 Hz.

Por otro lado, la curva del compuesto de goma tiene un rendimiento ascendente y favorable hasta de 3150 Hz. A partir de esta frecuencia desciende hasta los 4000 Hz con un valor de 0.41, para nuevamente ascender hasta un valor de 0.76 en 5000 Hz. Este efecto puede ser a causa de la porosidad de la composición fibra- goma.

### 4.5.3. Comparación de las muestras 24mm



*Figura 42.* Comparación de absorción sonora promedio entre diferentes aglutinantes con el mismo espesor 24mm.

Para este espesor, se denota que el barro y la goma conservan el mismo comportamiento a partir de los 315 Hz, pero con diferentes valores de absorción. La diferencia entre estos dos tipos de aglomerantes se encuentra concentrada en frecuencias medias que abarcan un rango determinado de frecuencias medias. Aunque la variación es mínima, cabe destacar que la goma alcanza el máximo valor de absorción en 0.9 a 2000 Hz y el barro en 0.78 a 1250 Hz.

En el caso del yeso, la respuesta es similar a la del barro hasta 630 Hz. A partir de dicho valor, la absorción baja en un promedio de 0.29 en medias-altas frecuencias, siendo este el que menos absorbe en comparación a los demás tipos.

En definitiva, el aglutinante que tiene mejor comportamiento en este espesor es el barro, debido a que abarca más en frecuencias medias, manteniendo un promedio aceptable de absorción.

#### 4.6. Evaluación de la prueba de secado para la fibra de caña de maíz expuesta al horno.

En este punto, se ha desarrollado una comparación de resultados obtenidos entre las fibras secas a la intemperie y las secas al horno. Dicho proceso se ha basado en Ali et al., (2018). Siguiendo el citado proceso, las fibras fueron expuestas en un horno doméstico a una temperatura de 60° C en un lapso de 6 horas. Cabe mencionar que para esta comparación no se han elaborado paneles, sino solo muestras para las diferentes combinaciones de fibra secas al horno y con mismos aglutinantes.

En la Figura 54 se muestra un ejemplo práctico, en el que se comparan los resultados obtenidos entre la fibra seca a la intemperie y la fibra seca en horno para el caso de bagazo-barro.

Las curvas de color anaranjado corresponden a la fibra seca a la intemperie, mientras que las curvas rojas corresponden a las secas al horno.

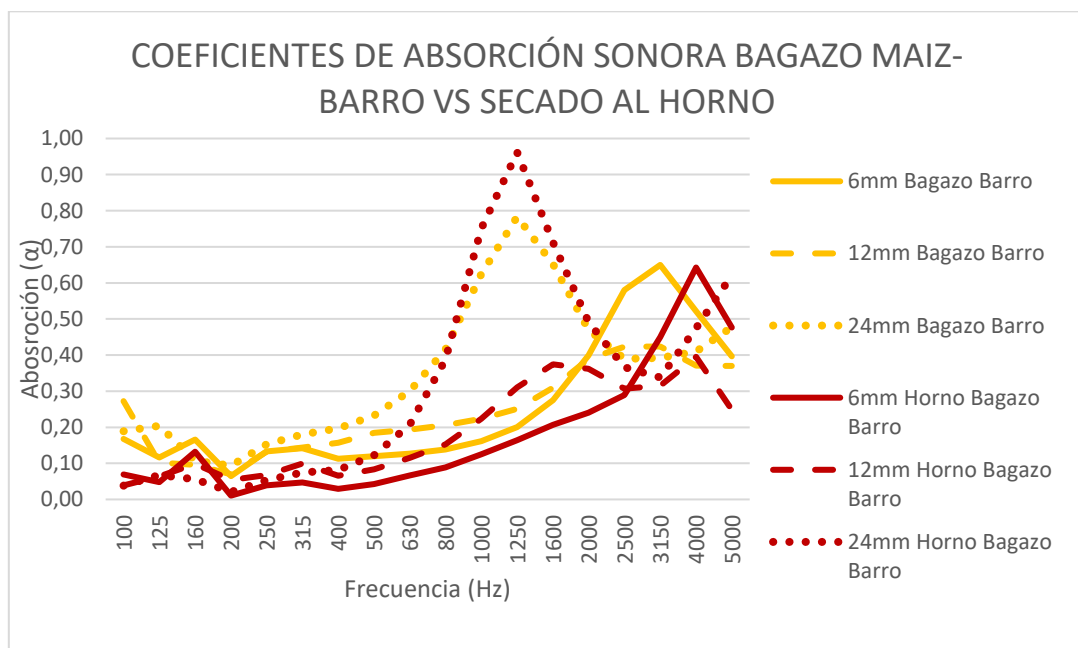


Figura 43. Comparación entre la fibra seca a la intemperie y la fibra seca en el horno, para el caso práctico del bagazo-barro.

Según el resultado obtenido en la Figura 43, para la comparación entre el espesor de 6mm, en la curva de secado al horno existe un leve desplazamiento hacia la derecha con respecto a la de fibra secada a la intemperie, considerando que tienen los mismos resultados de coeficiente de absorción. Por otro lado, en el caso de 12mm, la curva de secado al horno se ha desplazado levemente hacia las frecuencias medias, variando mínimamente la respuesta de absorción.

Finalmente, las curvas de 24mm tienen prácticamente el mismo comportamiento, sin notar desplazamiento alguno, aunque se observa que la curva correspondiente al secado al horno alcanza un mayor pico de absorción en la misma frecuencia respecto a la secada a la intemperie.

Nota: Se ha elegido ejemplo el aglutinante de barro, debido a que las demás combinaciones (maíz-goma y maíz-yeso), no han generado variaciones significativas entre las comparaciones, por lo que se ha optado en indicar estos resultados en la sección de "ANEXO 4".

#### **4.7. Comparación de las muestras "caña de maíz vs caña de azúcar"**

En los siguientes apartados, se indican y se describen los resultados obtenidos en la comparación entre las fibras de caña de maíz y caña de azúcar. Estos resultados representan los valores obtenidos en las mediciones correspondientes. Se ha tomado como referencia el trabajo realizado por Arroyo & Méndez, (2018), que proporcionan los datos de las mediciones de las fibras caña de azúcar. Para diferenciar los resultados se utilizaron en el gráfico dos colores que representan cada tipo de fibra. El rojo se utilizó para el maíz, y el naranja para la caña de azúcar. También se diferenciaron los tipos de aglutinante según el tipo de línea. (sólida para barro, guion para goma y punto redondo para yeso).

#### 4.7.1. Comparación de la caña de maíz vs la caña de azúcar espesor 6mm.

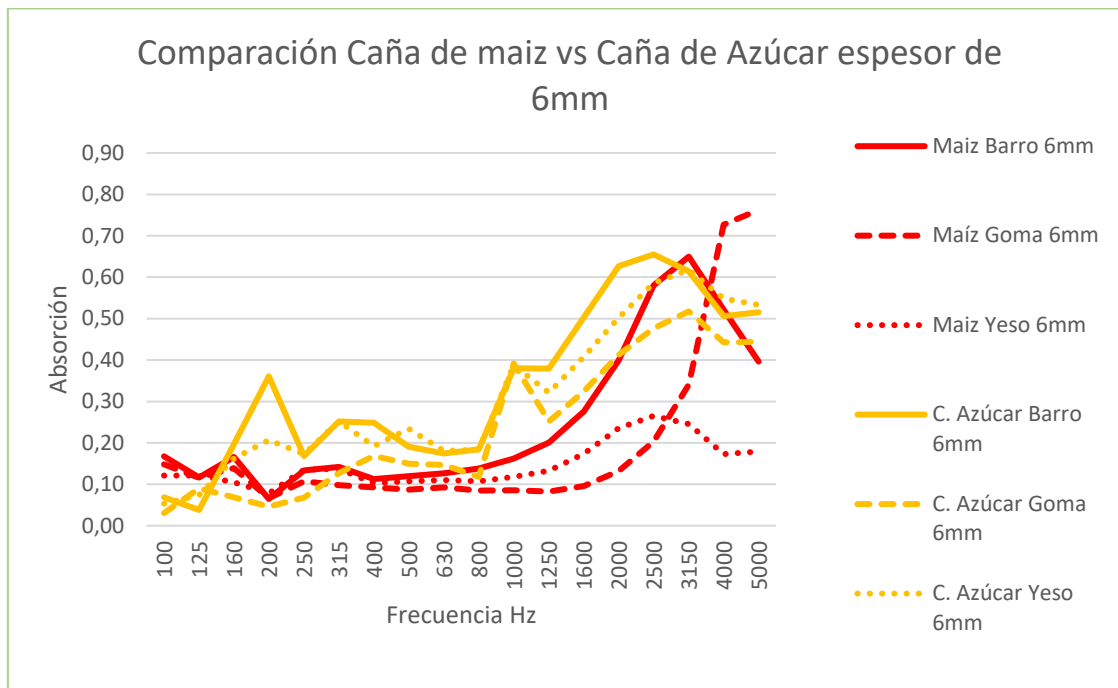


Figura 44. Comparación de absorción entre la caña de azúcar y la caña de maíz para el espesor de 6mm.

En la Figura 44, para este espesor, en el caso del barro, la variación del comportamiento de estas fibras surge desde la frecuencia de 250 Hz. A partir de esta, las dos fibras ascienden, predominando la fibra de caña de azúcar con mayores valores de coeficiente de absorción. A pesar de esto, posteriormente ambas curvas comparten el mismo valor máximo de 0.65 en 3150 Hz.

Para la comparación del aglomerante de goma, los resultados de estas fibras se describen a partir de los 400 Hz. A partir de aquí la diferencia es considerable, porque el resultado de absorción de la caña de azúcar prevalece sobre la de maíz, en todas sus frecuencias.

Finalmente, para el yeso se observa que las curvas se comportan en forma equidistante, provocando una gran diferencia de los valores de absorción, para todas las frecuencias. Del mismo modo que los casos anteriores la caña de azúcar con el aglutinante de yeso absorbe más que la de maíz en este espesor.

#### 4.7.2. Comparación de la caña de maíz vs la caña de azúcar espesor 12mm

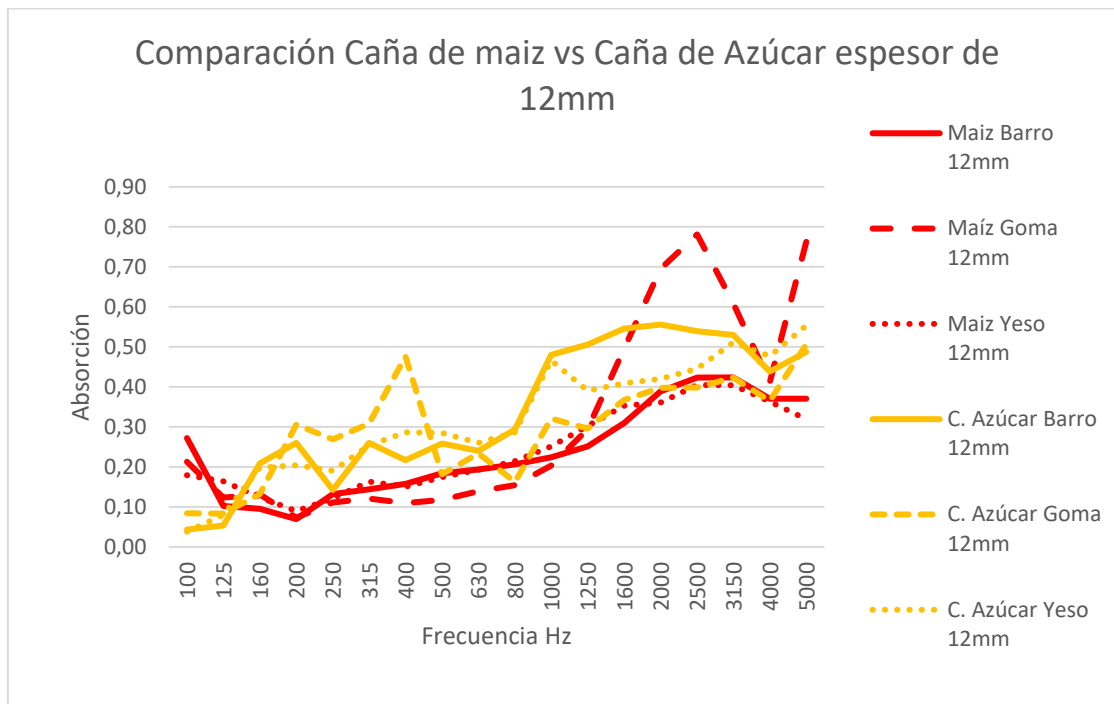


Figura 45. Comparación de absorción entre la caña de azúcar y caña de maíz para el espesor de 12mm.

En relación con el gráfico de la Figura 45, se describen los resultados obtenidos entre la fibra de maíz y la de azúcar para el espesor de 12mm.

En el caso del aglutinante barro, se observa que las curvas tienen un comportamiento semejante en casi todas sus frecuencias, aunque la diferencia de absorción es mínima. Del mismo modo que en casos anteriores, la caña de azúcar absorbe más que la de maíz. Por otra parte en la muestra de goma se observa que el mayor contenido de absorción está representado por la curva de caña de maíz, específicamente en las frecuencias altas entre el rango de 1600 Hz a 4000 Hz.

Por último, se observa que para las fibras correspondientes al yeso coinciden sus valores de absorción en casi todo el trayecto de la curva, aunque cabe resaltar que tanto para la caña de maíz como para la de azúcar, este tipo es el que menos absorbe con respecto a los demás aglutinantes.

#### 4.7.3. Comparación de la caña de maíz vs la caña de azúcar espesor 24mm.

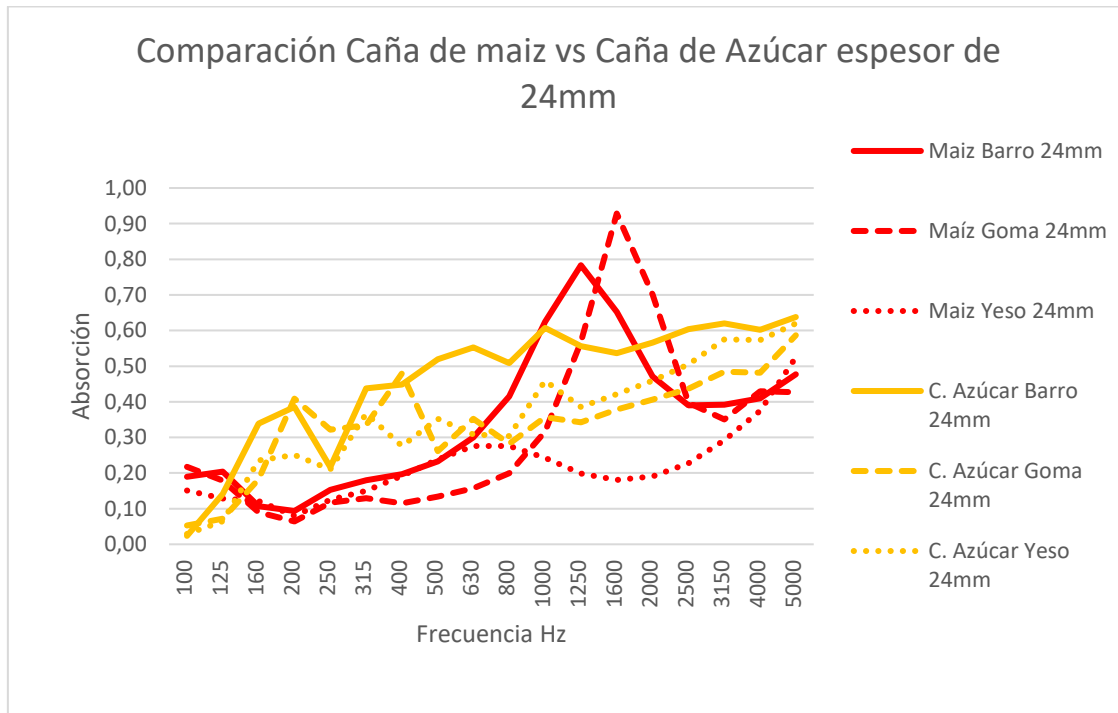


Figura 46. Comparación de absorción entre la caña de azúcar y la caña de maíz para el espesor de 24mm.

El resultado gráfico obtenido en la Figura 46, muestra la comparación entre los diferentes aglomerantes utilizados para un mismo espesor de 24mm.

Para la comparación entre los aglomerantes del barro, representados con una línea sólida, se puede observar que el comportamiento de las dos fibras es totalmente diferente, sin embargo, la fibra de maíz (línea roja) tiene una respuesta que asciende desde 250 Hz hasta los 100 Hz, en función al aumento de frecuencia, llegando a obtener un valor máximo de absorción de 0.78. Posteriormente esta línea desciende hasta 400 Hz con un valor de 0.37. Por otro lado, la caña de azúcar (línea naranja) aumenta de absorción a partir de los 250 Hz hasta los 5000Hz, en los que el valor es de 0.61.

Para el caso de goma, (líneas tipo guion), sucede el mismo comportamiento del caso anterior, pero a diferencia de la respuesta de absorción, cabe señalar que la curva es desplazada hacia la derecha, consiguiendo alcanzar un valor,

máximo 0.93 en la frecuencia en 1600 Hz, y con respecto a la caña de azúcar (guion naranja) tiene un rendimiento óptimo a partir de 500 Hz.

Finalmente, para la comparación de yeso (líneas tipo punto seguido), expresa un rendimiento equidistante, desde los 630 Hz, debido a que estas dos líneas se cruzan, sin embargo, cabe destacar que la curva color naranja, predomina sobre la roja. En definitiva, se puede evidenciar que el rendimiento de los casos de caña de azúcar supera a la caña de maíz, en casi todos los casos.



## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1. Conclusiones

Como resultado del trabajo de investigación se puede concluir que:

Para determinar las propiedades de absorción acústica de los paneles de fibra de maíz. Se utilizó el método de tubo de impedancia, siguiendo la norma UNE-EN\_ISO\_105342. Los parámetros analizados en el trabajo fueron la absorción global, la absorción promedio y la incertidumbre. También se realizó la comparación de los coeficientes de absorción de muestras con diferentes tipos de aglutinantes y diferente espesor.

La gran producción de maíz que existe en las zonas de la serranía ecuatoriana facilitó que los desechos durante las cosechas fueran utilizados para evaluar su potencial acústico en este trabajo. La fibra se mezcló con el yeso, la goma y el barro, lo que aumentó la rigidez del panel en vista de que son componentes económicos y de fácil alcance.

Con respecto a la construcción de los paneles, se obtuvieron inconvenientes en relación con la composición de las fibras y el aglutinante. Esto sucedió especialmente para los casos de yeso y barro, ya que los paneles obtenidos resultaron ser muy frágiles y difíciles de desprender del molde. Por otro lado, la fibra maíz-goma, es la única mezcla que no tiene problemas al adherirse, pero la desventaja de esta es que sus dimensiones se contrajeron al secarse.

Para el secado de la fibra se utilizaron dos alternativas. En la primera, se expuso la fibra a temperatura ambiente, extendiéndose el proceso un día y medio más de lo previsto, a causa de las lluvias. Para la segunda alternativa se realizó un ensayo con las fibras secadas en un horno doméstico a 60°C durante 6 horas, obteniendo resultados favorables para el secado homogéneo de las muestras de bagazo de maíz. Además, se evaluó la pérdida de peso existente entre los dos métodos, teniendo como resultado una reducción de 4.5% después de haber pasado por el horno. Dado la diferencia no fue considerable, el trabajo se ha realizado con la fibra secada a la intemperie.

En comparación con los diferentes aglutinantes y mismo espesor, se considera que el yeso es el que tiene un comportamiento ascendente a lo largo de su respuesta en frecuencias. Es decir que, a medida que aumenta la frecuencia su absorción también aumenta, a pesar del comportamiento de la curva, este aglutinante es el que más baja absorción presentó en función a los demás. Por el contrario, dentro del trabajo de investigación la combinación “barro-caña de maíz” se destaca en valores de absorción en algunos análisis y comparaciones desarrollados, ya que su rendimiento en absorción es más destacado para la sección de medias altas frecuencias.

Por otro lado, la mezcla maíz-goma, en la mayoría de los casos posee un rendimiento válido para las altas frecuencias, siendo esta una de las mezclas más orientadas a la absorción de una frecuencia en específico. Cabe destacar que, por debajo de los 400 Hz, los resultados de absorción para esta composición no suelen ser significativos, por lo que se concluye que el material no es adecuado para reforzar la absorción en frecuencias medias y bajas.

Al comparar la fibra de caña azúcar con la caña maíz, se determina que, en todos los casos, la fibra de caña de azúcar tiene mejor comportamiento que la de maíz en lo que se refiere a valores de coeficiente absorción. Sin embargo, cabe señalar que las curvas siguen tendencias similares.

Se utilizaron 6 mediciones por cada muestra obteniéndose grados de incertidumbre muy bajos, cabe mencionar que mientras más mediciones se realicen para una muestra, el resultado se aproximará más a un valor real y por ende tendrá mayor validez.

El resultado del coeficiente de absorción global máximo se obtuvo para la combinación maíz-barro de 24mm, con un valor de 0.3 y con una característica de absorción para medias y altas frecuencias (MH). Para los espesores de 6mm y 12mm no se incluyeron indicadores debido a que sus resultados son bajos y no superan los 0.25, conforme la norma UNE-EN\_ISO\_11654.

Finalmente, en base a los resultados obtenidos y a las comparaciones realizadas se comprueba que la fibra de maíz no presenta una capacidad de absorción acústica que pueda considerarse significativa.

## **5.2. Recomendaciones**

Con respecto a la recolección de la materia prima, para desarrollar el mismo proceso de trituración se debe utilizar tallos que conformen parte de un período de maduración, en el que comprenda entre 90 a 270.

Se pueden utilizar otras técnicas para combinar el tratamiento y composición del material absorbente. Esto puede ser a base del secado de la fibra mediante hornos industriales o mediante máquinas de electro-hilatura, que son capaces de transformar la fibra en filamentos.

Para proyectos posteriores, se recomienda tratar la fibra, utilizando otros aglutinantes y mezclar usando solo la corteza o el almidón del tallo de maíz, para evaluar nuevos resultados y verificar si la capacidad de absorción aumenta o disminuye.

Se recomienda que para la creación de nuevos materiales acústicos ecológicos se establezcan espesores superiores a 30mm, para que tengan valores de absorción comparables con los materiales comerciales y además de utilizarlos como un material absorbente, también puedan aportar funcionalidad en el área de aislamiento acústico.

Se puede tratar de mejorar su rendimiento trabajando en las técnicas de elaboración de extracción y composición, ya sea con más aglutinantes, con más cantidad de fibra o incluyendo procesos industriales.

## REFERENCIAS

- Ali, A., Shaker, K., Nawab, Y., Jabbar, M., Hussain, T., Militky, J., & Baheti, V. (2018). *Hydrophobic treatment of natural fibers and their composites- A review*. *Journal of Industrial Textiles*. SAGE Publications Sage UK: London, England. <https://doi.org/10.1177/1528083716654468>
- Arroyo, J. S., & Méndez, S. I. (2018). Obtención y caracterización de un panel acústico a partir del desecho de la caña de azúcar. Recuperado el 26 de noviembre del 2018 de <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/8724>
- Asdrubali, F., Schiavoni, S., & Horoshenkov, K. (2012). *A review of sustainable materials for acoustic applications*. *Building Acoustics*, 19(4), 283–311. <https://doi.org/10.1260/1351-010X.19.4.283>
- Berardi, U., & Iannace, G. (2015). *Acoustic characterization of natural fibers for sound absorption applications*. *Building and Environment*, 94, 840–852. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2015.05.029>
- Blanes, M., Marco, B., Alba, J., Del Rey, R., & Escuder, E. (2010). Estudio preliminar del uso de polímeros sintéticos para aplicaciones en acústica arquitectónica. Recuperado el 29 de noviembre del 2018 de <http://www.sea-acustica.es/fileadmin/Coimbra08/id127.pdf>
- Cabello, J. (2010). Experimentos sencillos de onda estacionaria en tubos. *Revista de Enseñanza de La Física*, 23(4), 109–113.
- Carrión, A. (2001). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos* (2.<sup>a</sup> ed). Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- Castillo, J., & Costa, A. (2012). *Características físicas de materiales absorbentes sonoros porosos*. Córdoba Argentina. Recuperado el 6 de mayo del 2019 de <http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayellectroacustica/pub/file/FAyE0412E1-Castillo-Costa.pdf>
- González, G., García, C., Morcillo, M., & Hernández, M. (2008). Propiedades acústicas intrínsecas de los asfaltos porosos: porosidad, tortuosidad y

- resistividad al flujo estático de aire . diseño óptimo de un asfalto. *Construcciones y Obras Llorente*, 2(2), 12.
- Goza, Z. (2014). Sistema de medida de propiedades acústicas de materiales. Recuperado el 5 de mayo del 2019 de <http://www.grupoalava.com/.../tubo-impedancia-kundt-spectronics-acupro-caracteristicas>
- Guzel, G., Yilmaz, E., & Deveci, H. (2018). *Sustainable nanocomposites of epoxy and silica xerogel synthesized from corn stalk ash: Enhanced thermal and acoustic insulation performance*. *Composites Part B: Engineering*, 150, 1–6. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2018.05.039>
- Internacional Organization for Standardization. (1998). Absorbentes acústicos para su utilización en edificios Evaluación de la absorción acústica. (*ISO Standard No. 11654:1998-Acústica*).
- Internacional Organization for Standardization. (2002). Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia. Parte 2: Método de función de transferencia (*ISO Standard No. 10534-2 Acústica*).
- Jiménez, M. del C., & Ochoa, G. A. (2014). Reutilización del bagazo de la caña de azúcar, en la elaboración de tableros y su aplicación en paredes, pisos y cielos falsos. *Area Técnica*, 50–70. Recuperado el 7 de mayo del 2019 de <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/11061>
- Kintto, L. (2016). Ecuador: Creativo potencial económico de las fibras vegetales. Recuperado el 26 de noviembre del 2018 de <http://www.ipsnoticias.net/2000/04/ecuador-creativo-potencial-economico-de-las-fibras-vegetales/>
- Mamtaz, H., Fouladi, M., & Al-Atabi, M. (2016). *Acoustic Absorption of Natural Fiber Composites*. *Journal of Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5836107>
- Morales, R. (2015). Manejo de cultivos andinos del Ecuador. (*D. A. Aguirre, Ed.*) (*Comision E*). Quito. Recuperado el 12 de mayo del 2019 de

[https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10163/4/Manejo Cultivos Ecuador.pdf](https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/10163/4/Manejo%20Cultivos%20Ecuador.pdf)

Mujté, P., Méndez, J., Vilaseca, F., López, J. ., Flández, J., Barberá, L., ... Pelach, M. . (2008). Residuos de tallo de maíz como refuerzo de polipropileno. *Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 23–24. Recuperado el 5 de junio del 2019 de <http://www.redisa.net/doc/artSim2008/tratamiento/A18.pdf>

Navas, G., & Santander, N. (2011). Diseño y construcción de un tubo de impedancia. *Sonac 2011*, 1, 55–65.

Olmo, O., Gutierrez, A., Herrera, M. A., Cabo, O., Polo, G., & Rodriguez, N. (n.d.). El bagazo de la caña de azúcar. propiedades, constitución y potencial, *Parte 5*, 87. Recuperado el 5 de junio del 2019 de [http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS\\_TECNICAS/032/New/Documentación/Parte V/Parte V.pdf](http://karin.fq.uh.cu/acc/2016/CIENCIAS_TECNICAS/032/New/Documentación/Parte%20V/Parte%20V.pdf)

Penchev, A. (2010). Mecanismos de propagación del sonido - Megafonia y Sonorización Aleksandar Penchev. Recuperado el 15 de junio del 2019 de <https://sites.google.com/site/megafoniaysonorizacionalekspen/10-megafonia-y-sonorizacion/01-principios-basicos-del-sonido/1-5-mecanismos-de-propagacion-del-sonido>

Peng, L., Song, B., Wang, J., & Wang, D. (2015). *Mechanic and Acoustic Properties of the Sound-Absorbing Material Made from Natural Fiber and Polyester*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2015/274913>

Sancho, J., Llinares, J., & Llopis, A. (2011). *Acústica arquitectónica y urbanística* (2.ª ed). Valencia: Universitat Politecnica de Valencia

Sari, N. H., Wardana, I. N. G., Irawan, Y. S., & Siswanto, E. (2016). *Physical and Acoustical Properties of Corn Husk Fiber Panels*. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2016, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2016/5971814>

Sumba, L. (2013). Producción historica del maíz duro y seco. Recuperado el 6

de mayo del 2019 de  
[http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios\\_agroeconomicos/produccion\\_historica.pdf](http://sinagap.agricultura.gob.ec/pdf/estudios_agroeconomicos/produccion_historica.pdf)

- Tang, X., Zhang, X., Zhang, H., Zhuang, X., & Yan, X. (2018). *Corn husk for noise reduction: Robust acoustic absorption and reduced thickness*. *Applied Acoustics*, 134, 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.01.012>
- Thakur, V. K., & Thakur, M. K. (2014). *Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites*. *Carbohydrate Polymers*, 109, 102–117. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2014.03.039>
- Velázquez, S., Peláez, G., & Giraldo, D. (2016). *Use of vegetable fibers in polymer matrix composites: a review with a view to their application in designing new*. <https://doi.org/1805468015>
- Yáñez, C., Zambrano, J., Caicedo, M., & Heredia, J. (2013). *Guía de producción de maíz para pequeños agricultores y agricultoras*, (96). Recuperado el 7 de junio del 2019 de <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/2435>

## **ANEXOS**



## ANEXO 1

### Glosario de términos

**Absorción del sonido.** - Este fenómeno, denominado absorción, depende de la energía sonora que incide sobre superficies del recinto, y consiste en que parte de la energía incidente que se transmite al recinto contiguo o se disipa a lo largo de la superficie de incidencia. Generalmente, la reducción de la energía puede ser ocasionada por: el aire, el público, las sillas y materiales absorbentes colocadas en zonas como revestimiento. (Carrión, 2001).

**Acondicionamiento acústico.** - El acondicionamiento acústico consiste en la definición de las formas y revestimientos de las superficies interiores de una sala, con el objetivo de controlar las condiciones acústicas desfavorables para una aplicación u otra. Este fenómeno se controla mediante el uso y correcta ubicación de dispositivos como difusores, resonadores, paneles reflectantes, paneles absorbentes entre otros, garantizando una buena difusión del sonido en un espacio determinado (Carrión, 2001).

**Aislamiento acústico.** - El aislamiento acústico hace referencia a la cantidad de materiales, técnicas y tecnologías para independizar acústicamente el recinto tratado. Para el control de la transmisión sonora hay que tener en consideración tres elementos básicos que son: la fuente de ruido, el canal de transmisión y el local receptor. Según la forma de propagación de la onda, el ruido puede producirse a través del aire, por medio de impactos o vibración.

**Norma UNE EN ISO 10534-2.-** Esta normativa se caracteriza por regular el procedimiento para la determinación del coeficiente de absorción acústica con incidencia normal a través de un tubo de impedancia, que consta de dos micrófonos ubicados equidistantes en una posición cercana a la muestra y a un sistema digital de análisis de señal. Además, esta norma sirve para determinar la impedancia acústica superficial de los materiales. Puesto que las características de un material absorbente se relacionan con las propiedades

físicas como: la resistencia al flujo de aire, porosidad, elasticidad y densidad. (ISO, 2002).

**Norma UNE EN ISO 11654-1998.-** Esta norma evalúa los resultados obtenidos de los absorbentes acústicos que se utilizan en la edificación. En relación con el capítulo "IV", se describen los pasos para transformar los coeficientes de absorción acústica de los materiales en un solo valor global, incluso permitiendo la caracterización de un material a través del resultado obtenido en la frecuencia de 500 Hz, según lo que indica la normativa. Cabe mencionar que este procedimiento se utiliza únicamente para las aplicaciones, donde abarcan la totalidad del espectro frecuencial de 20Hz a 20 kHz, para la curva de referencia (ISO, 1998).

## **ANEXO 2**

### **Configuración de Software Acu Pro Spectronics.**

Una vez conectados los diferentes dispositivos conforme a la cadena electroacústica, se procedió a configurar el programa ACUPRO. La configuración se organiza por secciones, en las que se definieron los parámetros utilizados para la medición de absorción.

A continuación, se detallarán los pasos de configuración del software ACUPRO Spectronics.

- 1) Armar la cadena electroacústica de acuerdo con la Figura 28. Considerando todos los dispositivos mostrados.
- 2) Abrir el programa ACU - PRO.
- 3) Ir a pestaña DAQ. Configurar las entradas y salidas de la interfaz DT9837A de la siguiente manera como lo muestra la siguiente Figura 30.
  - a) Especificar el rango de los canales de +- 1Vol.
  - b) Elegir el ruido tipo de ruido "*White Noise*", que se va a emitir por la fuente de sonido
  - c) Amplitud de 2.5 V.

- d) Para medir absorción, la distancia entre los micrófonos se utiliza (29.21mm y 50.8mm).

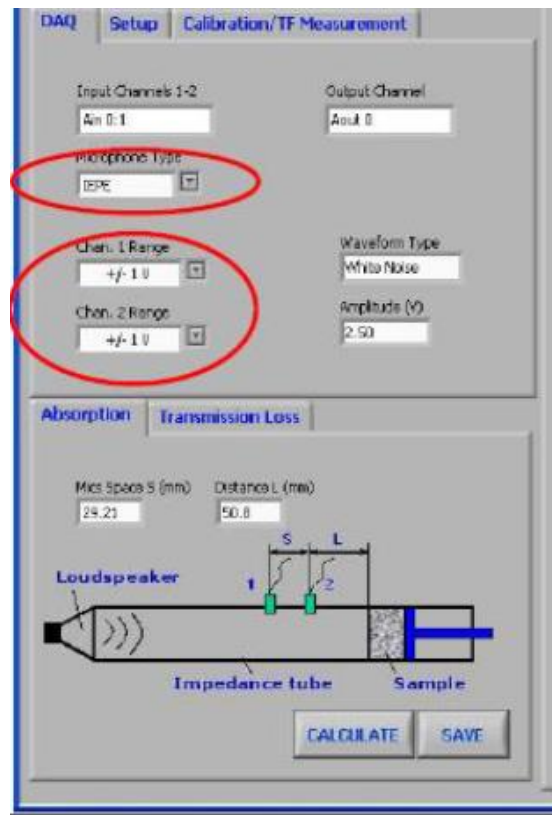


Figura 47. Entorno de configuración ACUPRO DAQ.

Tomado de (Spectronics, 2014, p.08).

- 4) Pestaña SETUP. Selecciona los límites de frecuencia como también el período de medición, además en esta sección se configuran los parámetros ambientales los cuales se deben medir con dispositivos dedicados para medir temperatura ambiente.

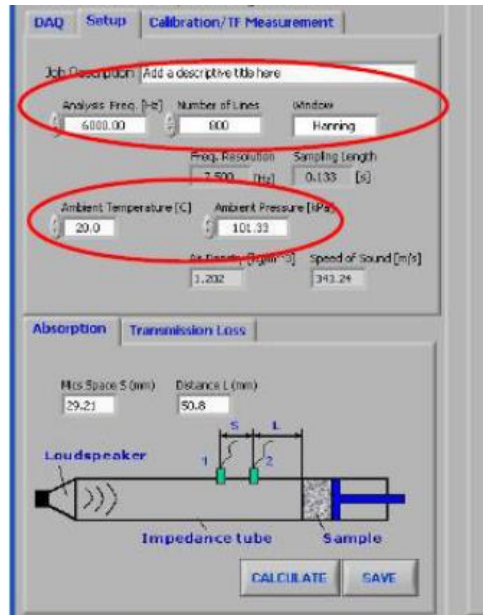


Figura 48. Entorno de configuración ACUPRO SETUP.

Tomado de (Spectronics, 2014, p.08).

- a) **Análisis Frecuencia.** - Configura el límite en el cual se realiza el barrido frecuencial. De acuerdo con el manual, se introduce un valor de 6000Hz.
- b) **Número de líneas.** - Expresa el número de líneas que se genera en el barrido de frecuencias. Se coloca un valor de 800.
- c) **Resolución de Frecuencia.** - Es la cantidad de muestras que la interfaz traduce de la recepción de los micrófonos hasta modelar dicha señal. Se utiliza el valor de 7500 Hz.
- d) **Duración de Muestreo.** – Tiempo que se demora en muestrear a la señal analógica. De acuerdo con el manual, se recomienda utilizar el valor de 0.133s
- e) **Temperatura Ambiente.** - Se expresa en grados centígrados, y se utiliza el valor estándar de la temperatura la cual se realiza la medición, por lo general se impone a 20°C.
- f) **Presión Ambiente.** - Este parámetro expresa la presión en la cual está sometida el tubo de impedancia. Se establece un valor de 101.33 kPa.

#### Calibración del sistema de medición.

Es transcendental tener en cuenta la etapa de calibración antes de medir, ya que los errores de medición no son aceptables cuando se trata de precisar el comportamiento de materiales ante diversos procesos mecánicos y condiciones acústicas.

Para realizala correctamente se deben tener en cuenta varios factores y seguir al pie de la letra los siguientes pasos:

- 1) Ir a "Calibration/ TF Measurement. Como se muestra en la Figura 52, existe un botón de Start y Stop. Para pulsarlos es necesario seguir los siguientes pasos.
  - a) Verificar que esté en RMS o sino configurar en el documento de texto que se ubica dentro de la carpeta del destino del programa.
  - b) El promedio de intervalo de medición se realizará en un conteo de 100.

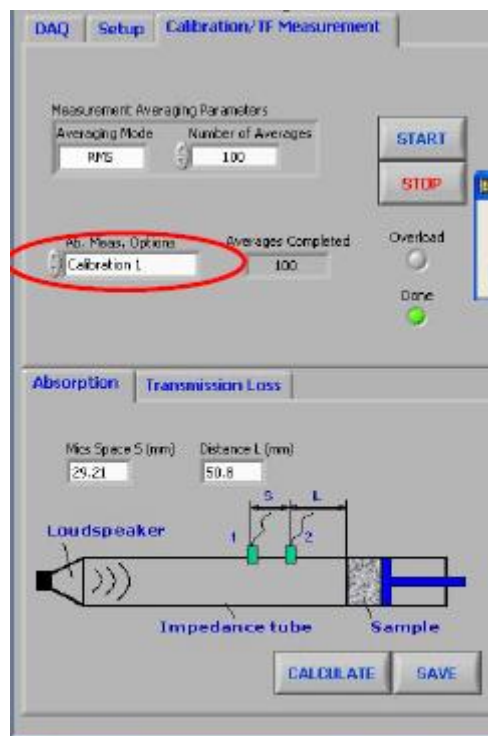


Figura 49. Entorno de calibración ACUPRO Calibración.

Tomado de (Spectronics, 2014, p.09).

- 2) Calibración, este proceso se lo debe realizar de la siguiente manera:
  - a) Colocar las muestras de calibración en el porta muestras y asegurarlas.

- b) Dar “start” para verificar el voltaje enviado al altavoz, se debe recordar que NO supere los 3 Vol RMS.
- c) Elegir “calibration 1”, que corresponde al *mic 1* en la entrada A0 y *mic 2* en la entrada A1, para verificar la respuesta de la calibración en la función de transferencia de magnitud y fase.
- d) Utilizar una muestra absorbente para evaluar la calibración, en relación al manual, que recomienda trabajar con la muestra del tipo fonoabsorbente Hc, propia del tubo de impedancia.



Figura 50. Muestra fonoabsorbente para calibración Hc del tubo de impedancia.

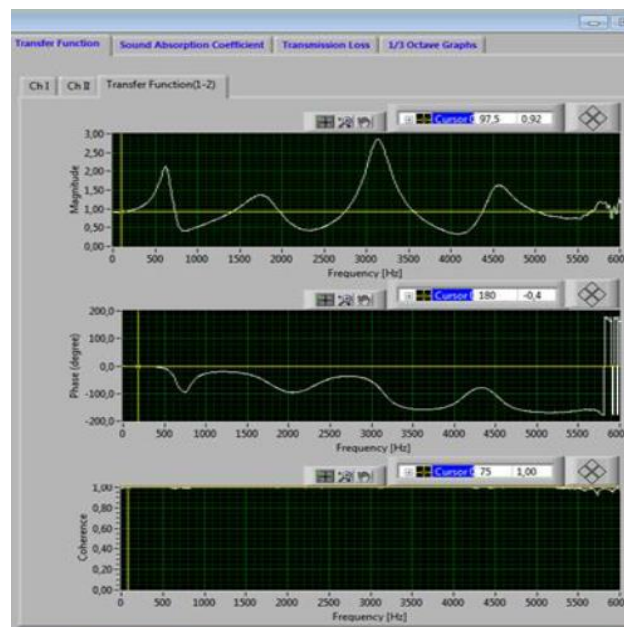


Figura 51. Información de curvas conforme a la calibración 1. ACUPRO.

Tomado de (Spectronics, 2014, p.10).

En la Figura 54 se muestra la respuesta de magnitud, fase y coherencia con relación a la prueba de calibración 1, prácticamente el resultado en la sección de magnitud indica una curva en filtro peine, y en la curva de fase de igual manera, pero de forma decreciente. Por consiguiente, en la calibración 2 se deberán invertir las curvas obtenidas.

- e) Consecutivamente, cambiar físicamente el orden de los micrófonos desde la interfaz, es decir canal A0 - mic 2 y canal A1 - mic 1. Esto es necesario para que el cambio de fase se produzca. Luego seleccionar “*calibration 2*” y “*start*”.

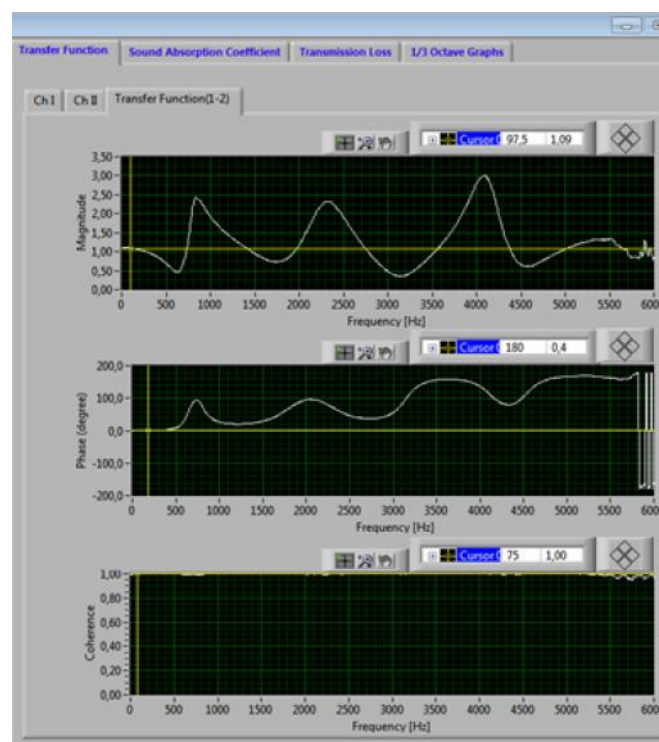


Figura 52. Información de curvas conforme a la calibración 2. ACUPRO.

Tomado de (Spectronics, 2014, p.11).

En la Figura 55, a diferencia del resultado de la Figura 54, se muestra las mismas curvas en forma creciente. Esto indica que la calibración de los micrófonos se ha cambiado de posición y se han seguido las recomendaciones del manual ACUPRO.

- 3) Por último, todos estos procedimientos definen que el equipo está debidamente calibrado para proceder con las mediciones previstas. Mientras

que los “Files” o archivos de calibración se guardan en la carpeta de instalación del software.

### Configuración para medir absorción.

Una vez realizada la calibración, conforme a los pasos recomendados en el apartado anterior, se procede a recuperar la posición de los micrófonos como en la etapa de calibración 1, es decir que el micrófono 1 se conecta a la entrada A0 de la interfaz y el micrófono 2 a la señal A1.

Seguidamente, en el entorno del ACUPRO, se selecciona la opción “*Calibration/TF Measurement*”, para continuar con la pestaña “*ab. meas. Options*”, en donde se elige la opción “*Absortion Sample*”.

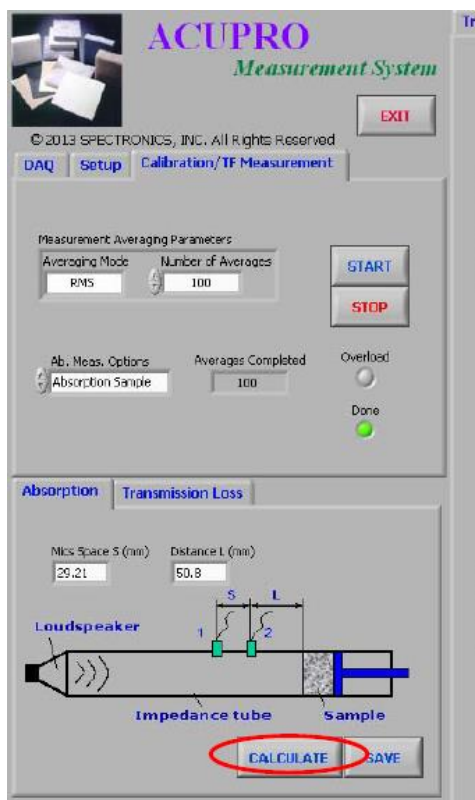


Figura 53. Configuración ACUPRO para realizar la medición de absorción de la muestra.

Tomado de (Spectronics, 2014, p.11).



Para proceder a medir la muestra, hay que considerar que la misma este colocada en el dispositivo del “porta muestras” al ras de la superficie del tubo, tal como se muestra en la siguiente Figura 57.



*Figura 54.* Colocación ideal de las muestras en el adaptador de tubo de impedancia, "Porta muestras".

Tomado de (Spectronics, 2014, p.12).

Una vez instalada correctamente la muestra en el adaptador del tubo, se aplica la opción “*Start*” en el programa ACUPRO, procedimiento que debe marcar el tiempo de muestreo, configurado con la opción “*Number of Averages*”, para finalmente obtener los resultados pulsando (*click*) en el botón de “*Calculate*”.

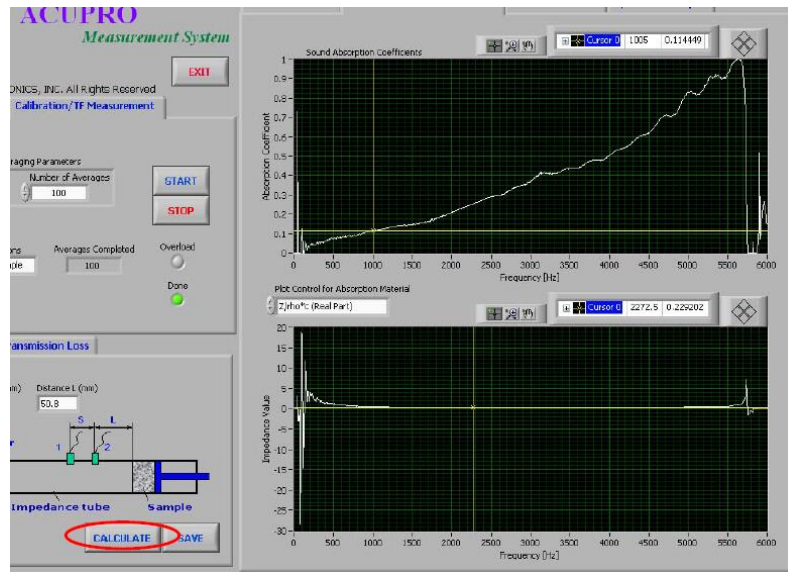


Figura 55. Resultado de la medición sección “Sound Absortion Coefficient”

Tomado de (Spectronics, 2013, p.12).

Para visualizar gráficamente los resultados simultáneos, desde este programa, se pueden escoger las opciones:” Transfer *Fuction*”, “*Sound Absortion Coefficient*” o “*1/3 Octave Graphs*”, las que se almacenan en un archivo generado por la opción “*Save*”, que se ubica automáticamente en la capeta de instalación del software.

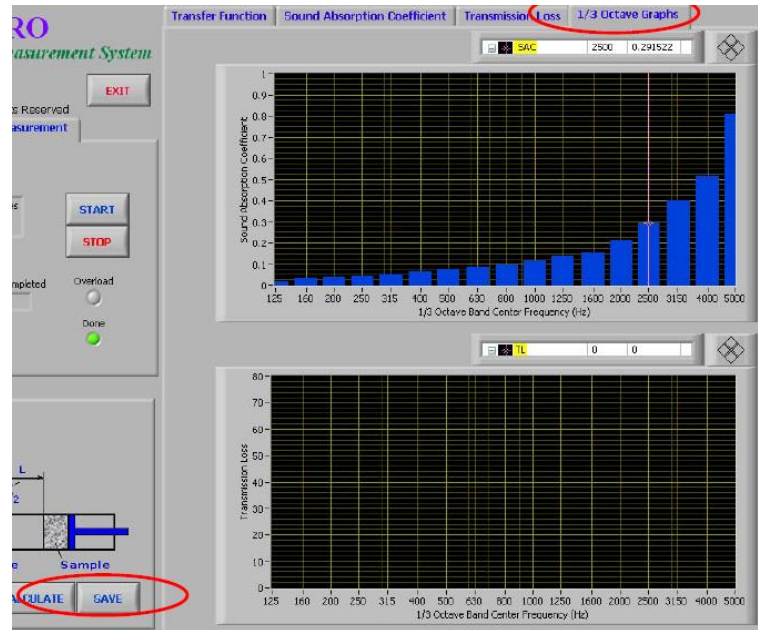


Figura 56. Resultado de la medición mediante la gráfica de 1/3 de Octava ACUPRO, muestra de prueba “fonoabsorbente tipo Hc”.

Tomado de (Spectronics, 2013, p.12)

### Anexo 3

Mediciones obtenidas de coeficiente de absorción promedio otorgado por el programa ACUPRO en gráfica de 1/3 de octava.

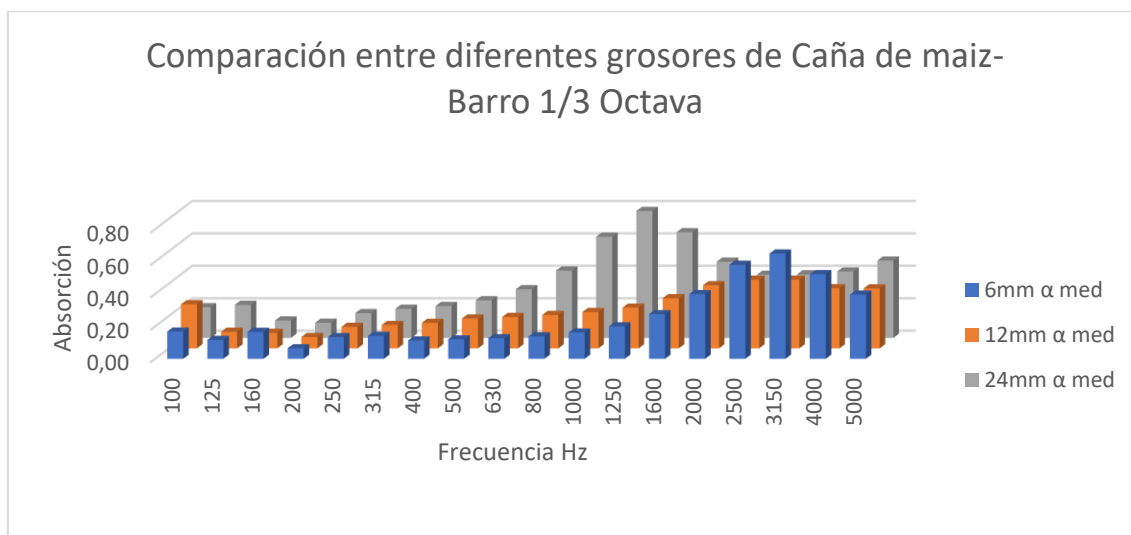


Figura 57. Comparación del coeficiente de absorción medido en 1/3 de octava para caña de maíz-barro.

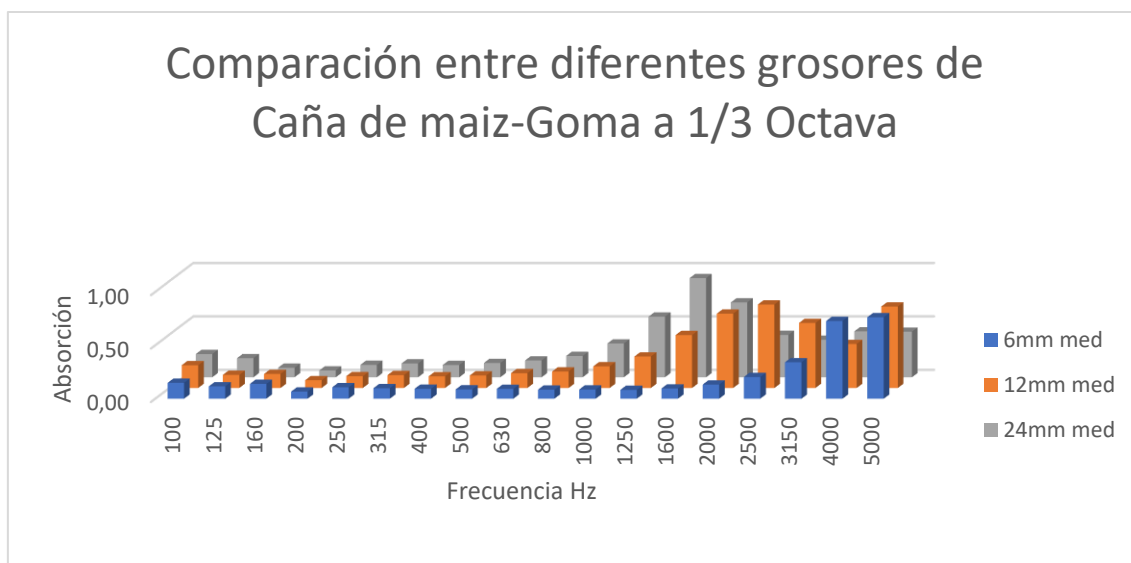
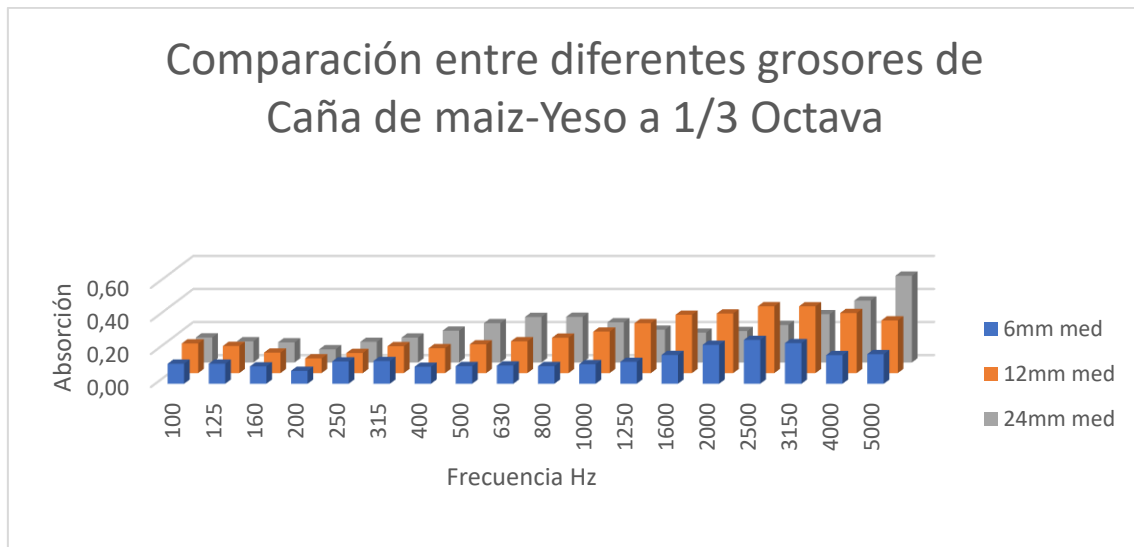


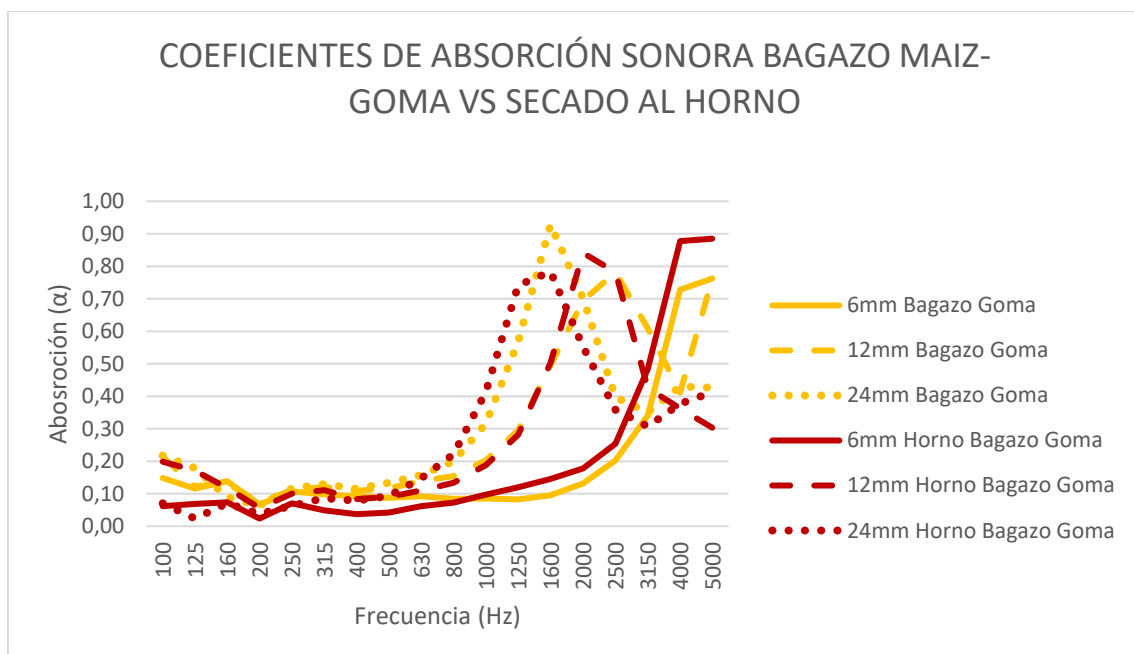
Figura 58. Comparación del coeficiente de absorción medido en 1/3 de octava para caña de maíz-goma.



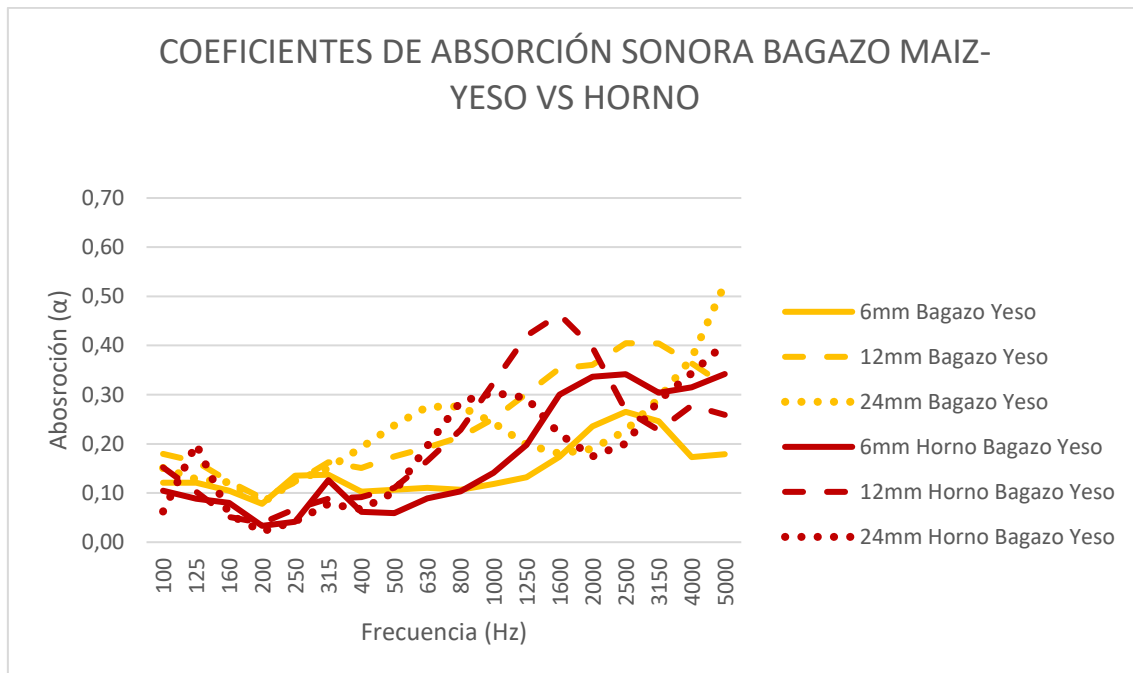
*Figura 59.* Comparación del coeficiente de absorción medido en 1/3 de octava para caña de maíz-yeso.

#### ANEXO 4

#### Comparación entre fibras de caña de maíz y caña de azúcar restantes, goma y yeso.



*Figura 60.* Comparación entre la fibra seca a la intemperie y la fibra seca en el horno, para el caso práctico del bagazo-goma.



*Figura 61.* Comparación entre la fibra seca a la intemperie y la fibra seca en el horno, para el caso práctico del bagazo-barro.

## ANEXO 5

### Proceso de elaboración de paneles acústicos

#### GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE MOLDES Y PORTA MUESTRAS PARA FIBRA DE CAÑA DE MAIZ

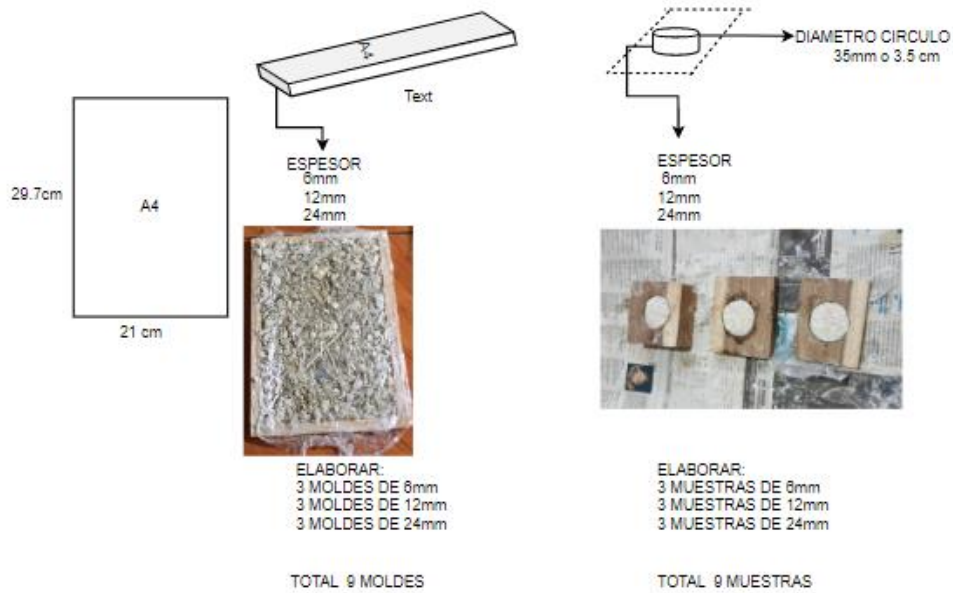


Figura 62. Guía de elaboración de paneles y muestras para carpintería.



Figura 63. Paneles y muestras de madera para el depósito de la fibra y aglomerante.



*Figura 64.* Fibra expuesta para el proceso de secado a la intemperie.



*Figura 65.* Fibra expuesta al horno doméstico, resultado de 91.2 gramos de reducción.



## ANEXO 5

Paneles obtenidos y muestras desarrollados en el proyecto de obtención y caracterización de la fibra de maíz.



*Figura 66.* Paneles acústicos de fibra de caña de maíz, obtenidos del desarrollo del proyecto



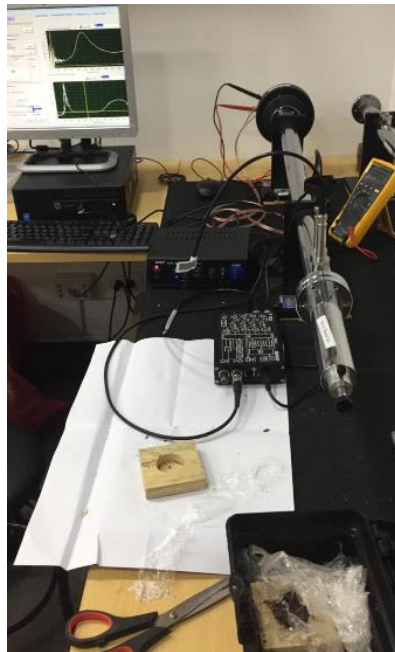
*Figura 67.* Muestras para la medición extraídas de los paneles de bagazo de caña de maíz.



*Figura 68.* Muestras resultantes de la etapa de fabricación de paneles.

## **ANEXO 6**

### **Instrumentación utilizada para la medición de absorción acústica.**



*Figura 69.* Montaje y ejecución del desarrollo de la medición de absorción.



Figura 70. Micrófonos sensibles de medición GRASS.



Figura 71. Altavoz JBL-2426J.



Figura 72. Amplificador de potencia PYLE PTA2.

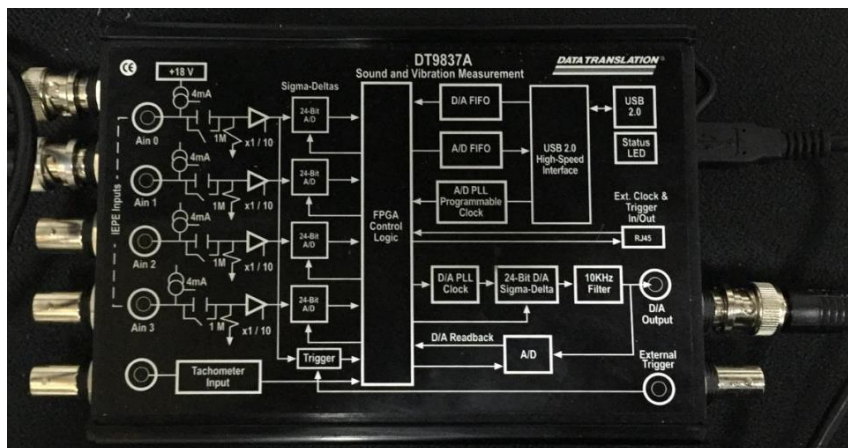


Figura 73. Interfaz DTA9837A.

