



# **ESTUDIO DE COMPÓSITOS DE FIBRAS NATURALES Y ARCILLA PARA APLICACIONES ACÚSTICAS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS E INGENIERÍA DE LOS  
MATERIALES

Presenta:

Ing. Uriel Victoria Martínez

Asesores

Dr. Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón    Dra. Sandra Loera Serna

## *Dedicatoria*

*A mi madre Adriana Martínez por tu amor incondicional, por ser mi principal motivo de inspiración para salir adelante a pesar de los obstáculos y por permitirme cumplir mi sueño gracias a todo tu esfuerzo y dedicación y a mi hermano Brandon Victoria porque siempre estás ahí para apoyarme, escucharme y darme ánimos para seguir adelante.*

## **Agradecimientos**

A mis asesores la Dra. Sandra Loera Serna y el Dr. Ernesto Rodrigo Vázquez Cerón, por el tiempo dedicado y los conocimientos brindados para llevar a cabo esta investigación, además de su paciencia, consejos, dedicación, amistad y apoyo incondicional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado, para realizar mis estudios de posgrado.

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN (CINVESTAV) por su apoyo para realizar las pruebas FT-IR.

Al laboratorio de Microscopia Electrónica de la UAM-A, por el apoyo para obtener las micrografías utilizadas en este proyecto.

Al jurado integrado por la Dra. Gabriela Báez Juárez, el Dr. Daniel Ramírez Rosales y el Dr. Salvador Carmona Téllez, por su tiempo brindado en la revisión de esta tesis.

Al Laboratorio de Análisis y Diseño Acústico por la utilización de su infraestructura para la realización de este proyecto.

Al Área de Química de Materiales de la UAM-A, por el permitirme utilizar sus instalaciones para realizar este proyecto.

En especial a mi madre Adriana Martínez y a mi hermano Brandon Victoria, por su confianza, comprensión, cariño, amor y apoyo incondicional.

A todos mis profesores que contribuyeron en mi formación profesional, compartiendo sus conocimientos y motivación para superarme.

## Resumen

Durante la última década, las acciones y estudios para contrarrestar los efectos del ruido se han incrementado mediante el uso de materiales aislantes o absorbentes, además de regulaciones civiles a partir del monitoreo en zonas urbanas, ya que la exposición a altos niveles de presión sonora puede causar problemas de salud psicológicos y fisiológicos como ansiedad, depresión, estrés, fatiga, problemas cardíacos, auditivos o cognitivos, así como la pérdida irreversible de audición. Este trabajo tiene como objetivo desarrollar y estudiar compuestos naturales hechos de arcilla reforzada con fibras de coco o nopal para analizar sus coeficientes acústicos y determinar sus aplicaciones como material de aislamiento o acondicionamiento. Los compósitos se obtuvieron mediante la incorporación de 25%, 50% y 75% en peso de cada fibra con la arcilla bentonita. La caracterización física y química de los compuestos se realizó mediante difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), microscopía óptica, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) y análisis termogravimétrico (ATG). Las propiedades de dureza y densidad aparente de los compósitos se obtuvieron de muestras con tres meses de envejecimiento. Mediante DRX, se identificaron en la bentonita los compuestos: montmorillonita, cuarzo y feldespato. El FT-IR permitió la identificación de los grupos funcionales de la arcilla y para las fibras se determinó la presencia de lignina y hemicelulosa. Las micrografías muestran que la fibra de coco es más porosa que la de nopal; el tamaño de las fibras de nopal fue de entre 71.8 y 219.7 nm (microscopía electrónica) y de las de coco fue de 0.1613 mm (microscopía óptica). La densidad aparente de los compósitos sigue el modelo de la regla de mezclas, mientras que la dureza cambia muy poco en las muestras preparadas con fibra de nopal. A través del ATG se encontró que la bentonita mejora la estabilidad térmica de los compósitos.

Los coeficientes acústicos de absorción, reflexión y transmisión de los materiales se determinaron mediante el método del tubo de impedancia, en el rango de 50 a 10 000 Hz. Las muestras obtenidas después del proceso de síntesis se caracterizaron en un tubo de impedancias de dos cámaras acústicas. Para las pruebas de humedad se agregaron hasta cuatro gotas de agua, obteniendo la respuesta al impulso en cada compósito para cada gota agregada. Los resultados para las muestras secas mostraron un aumento de las propiedades de absorción acústica al agregar las fibras en los compósitos, donde se observó que la fibra de coco presentó una mayor absorción de sonido que la fibra de nopal. La dureza y la densidad del material se relacionan directamente con una reducción del coeficiente de

absorción, aunque las pruebas realizadas muestran que las fibras de nopal en los compósitos no aumentan su dureza y sus propiedades acústicas, a diferencia de las fibras de coco. Los resultados obtenidos de la caracterización acústica realizados en la prueba de humedad superficial demostraron que los coeficientes de absorción, reflexión y absorción del coco cambian al aumentar la humedad en las muestras. Mientras que, para el caso del nopal, debido a su composición y propiedades hidrofóbicas, no se presenta una variación significativa en sus propiedades acústicas. Los compósitos realizados a base de fibra de coco presentan mejores propiedades de absorción y reducción acústica, mientras que los de fibra de nopal destacan en la reflexión de sonido.

## **Abstract**

During the last decade, actions and studies to counteract the effects of noise have increased through the use of insulating or absorbent materials, and civil regulations based on monitoring in urban areas, since exposure to high levels of sound pressure can cause psychological and physiological health problems such as anxiety, depression, stress, fatigue, cardiac, hearing or cognitive problems, as well as irreversible hearing loss. This work aims to develop and study natural compounds made of clay reinforced with coconut or nopal fibers to analyze their acoustic coefficients and determine their applications as insulation or conditioning material. The composites were obtained incorporating 25, 50 and 75% by weight of each fiber with bentonite clay. The physical and chemical characterization of the composites was performed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), optical microscopy, Fourier transforms infrared spectroscopy (FT-IR), and thermogravimetric analysis (TGA). The properties of hardness and apparent density of the composites were obtained from samples aged three months. Using XRD, the compounds were identified in the bentonite: montmorillonite, quartz and feldspar. The FT-IR allowed the identification of the functional groups of the clay and for the fibers the presence of lignin and hemicellulose was determined. Micrographs show that coconut fiber is more porous than nopal; the size of the nopal fibers was between 71.8 and 219.7 nm (electron microscopy) and that of the coconut fibers was 0.1613 mm (optical microscopy). The apparent density of the composites follows the model of the mixture rule, while the hardness changes very little in

the samples prepared with nopal fiber. Through ATG it was found that bentonite improves the thermal stability of the composites.

The acoustic absorption, reflection, and transmission coefficients of the materials were determined using the impedance tube method, in the range of 50 to 10,000 Hz. The samples obtained after the synthesis process was weighed and characterized in the impedance tube; For the humidity tests, a drop was placed on the surface of the sample and the characterization process was repeated. These tests were carried out until 4 drops of water were added to each composite. The results showed an increase in the acoustic absorption properties when adding the fibers in the composites, where it was observed that the coconut fiber presented a higher sound absorption than the nopal fiber. The hardness and density of the material are directly related to a reduction in the absorption coefficient, although the tests carried out show that the nopal fibers in the composites do not increase their hardness and their acoustic properties, unlike coconut fibers. The results obtained from the acoustic characterization carried out in the surface humidity test showed that the absorption, reflection and absorption coefficients of the coconut change with increasing humidity in the samples. While, in the case of nopal, due to its composition and hydrophobic properties, there is no significant variation in its acoustic properties. Composites made from coconut fiber have better acoustic absorption and reduction properties, while those made from nopal fiber stand out in terms of sound reflection.

## Contenido

Resumen	4
Abstract	5
Glosario	10
Dureza	10
Impedancia acústica	10
Convolución	10
Introducción	12
Objetivos	14
General	14
Específicos	14
Justificación	14
Capítulo 1: Antecedentes y estado del arte	16
1.1 Sonido	17
1.2 Ruido	21
1.2.1 El efecto nocivo del ruido en la salud	21
1.2.2 Recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud	22
1.2.3 Regulaciones del ruido en la Ciudad de México	23
1.3 Coeficientes acústicos	23
1.4 Tubo de impedancias	25
1.5 Respuesta al impulso	26
1.6 Fundamento de las técnicas de caracterización fisicoquímica	27
1.6.1 Difracción de rayos X (DRX)	27
1.6.2 Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)	28
1.6.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)	30
1.6.4 Microscopía óptica (MO)	31
1.6.5 Análisis termogravimétrico (ATG)	33
1.6.6 Ensayo de dureza Shore	34
1.7 Materiales para aislamiento acústico	34
1.7.1 Sintéticos	34
1.7.2 Naturales	35
1.7.3 Compósitos	36
1.8 Arcillas	38
1.8.1 Bentonita	39
1.9 Fibras naturales	40
1.9.1 Fibra de coco	40

1.9.2 Fibras de nopal	41
Capítulo 2: Procedimiento experimental	42
2.1 Obtención de las fibras naturales	43
2.1.1 Fibras de coco	43
2.1.2 Fibras de nopal	43
2.2 Síntesis de los compósitos	44
2.3 Caracterización acústica	45
2.3.1 Respuesta al impulso	46
2.4 Variación de la humedad relativa	47
2.5 Caracterización fisicoquímica	48
2.5.1 Difracción de rayos X (DRX)	48
2.5.2 Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)	48
2.5.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)	49
2.5.3 Microscopía óptica	49
2.5.4 Análisis termogravimétrico (ATG)	49
2.6 Ensayo de dureza Shore	50
2.7 Densidad aparente	50
Capítulo 3: Propiedades fisicoquímicas de los precursores	52
3.1. Análisis estructural <del>de la bentonita</del>	53
3.2 Análisis de los grupos funcionales	55
3.3 Análisis morfológico	56
3.4 Análisis termogravimétrico	58
Capítulo 4. Propiedades fisicoquímicas de los compósitos	60
4.1 Propiedades mecánicas	61
4.1.1 Densidad aparente	61
4.1.2 Dureza	62
4.2 Análisis morfológico	64
4.3 Análisis termogravimétrico	64
4.3.1 Compósitos de coco	64
4.3.2 Compósitos de nopal	65
Capítulo 5. Propiedades acústicas	67
5.1 Compósitos de coco	68
5.2 Compósitos de nopal	71
5.3 Comparación entre los compósitos con mejores propiedades acústicas	73
5.4. Análisis de humedad	75
5.5 Comparación del compósito de 75 % coco y 25% bentonita con materiales comerciales	82

5.6 Respuesta al impulso	84
Conclusiones	90
Trabajo a futuro	93
Referencias	93
Anexos	100
A. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad del tubo de impedancias	101
B. Análisis de humedad	102
C. Coeficientes acústicos de las muestras húmedas	103
D. Respuesta al impulso de los compósitos	107

## Glosario

### Dureza

La dureza es una magnitud específica de la materia que caracteriza la deformación local, concentrada en un pequeño volumen de su superficie exterior de un material o bien caracteriza la resistencia que opone un material al tratar de ser rayado o penetrado por otro. La Dureza está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas de un material [1].

### Impedancia acústica

La impedancia acústica ( $Z$ ), es la resistencia que ofrecen los materiales ante el paso de una onda sonora, esta puede ser expresada de la siguiente forma:

$$Z = \rho v \quad (1)$$

Donde ( $\rho$ ) es la densidad del material y ( $v$ ) es la velocidad del medio. Cuando se genera una onda en un sistema que cuenta con dos medios diferentes, se tendrá impedancias distintas  $Z_1$  y  $Z_2$ , si se conoce la impedancia acústica de ambos medios, se puede calcular la relación de energía sonora reflejada y transmitida en términos de la onda incidente, a partir de este principio es como opera el tubo de impedancias [2].

### Convolución

La convolución es un proceso matemático que nos permite determinar el comportamiento de un sistema a través de la aplicación de un estímulo, comúnmente se usa una delta de Dirac o impulso unitario en sistemas digitales. Sea  $x[n]$  una señal de entrada que pasa por un sistema  $h[n]$  se generara una salida  $y[n]$ , la cual podemos obtener mediante la siguiente ecuación [3]:

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k] = x[n] * h[n] \quad (2)$$

Si se conoce la respuesta al impulso de un sistema, se puede generar un modelo que permita predecir el comportamiento del sistema ante cualquier señal de entrada que se desee estudiar. A continuación, se muestra un ejemplo de la convolución entre dos señales, la Figura 1 muestra gráficamente en que consiste el proceso.

Sea una señal  $x[n] = [1 \ 2 \ 3]$  y  $h[n] = [2 \ 1]$  entonces:

$$y[0] = 2*1=2$$

$$y[1] = 2*2+1*1=5$$

$$y[2] = 2*3+1*2=8$$

$$y[3] = 1*3=3$$

$$y[n] = [2\ 5\ 8\ 3]$$

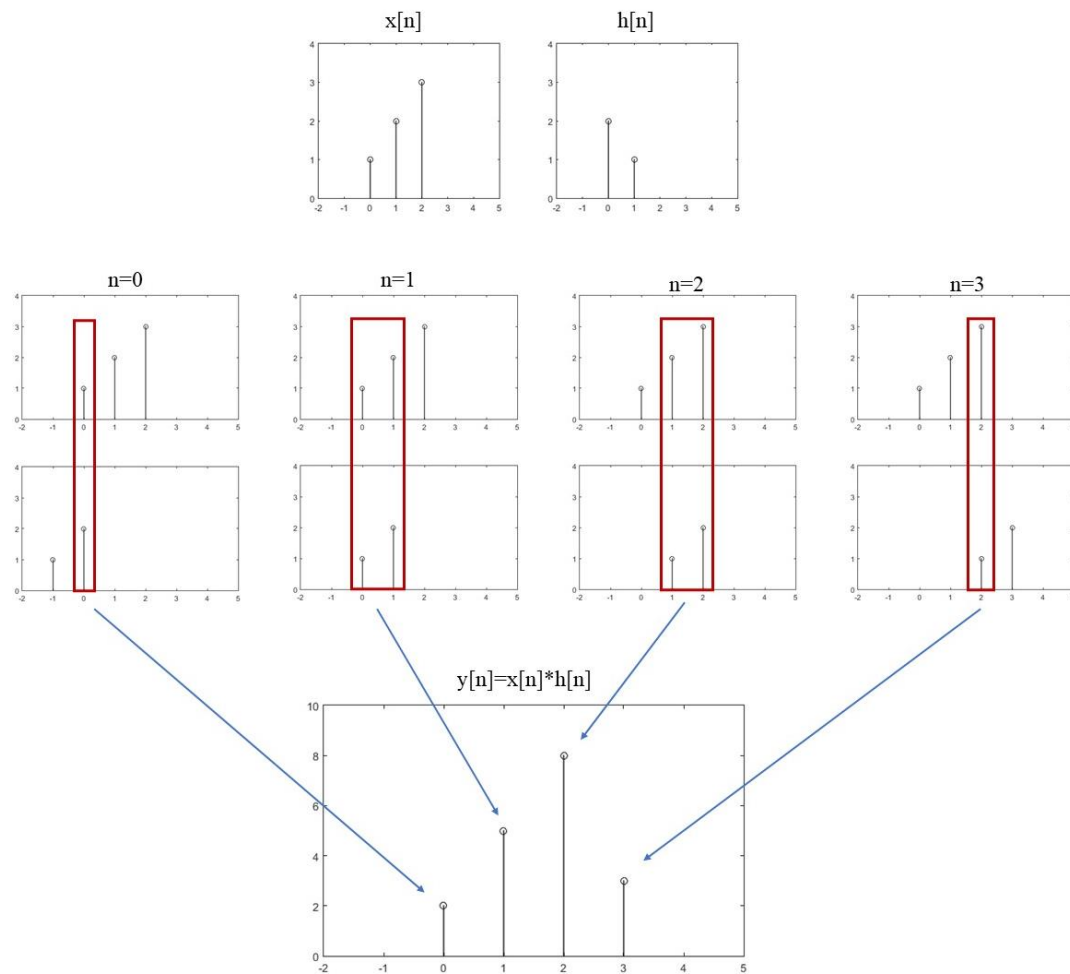


Figura 1. Representación gráfica del proceso de convolución.

# Introducción

Actualmente, el ruido es un problema de salud pública que debe ser atendido de manera inmediata, dado que se han realizado investigaciones donde se demuestra que la exposición a altos niveles de ruido y por un tiempo prolongado genera problemas de salud [4, 5, 6, 7, 8]. Los estudios reportan que un nivel de ruido que exceda los 65 dB por más de 8 horas puede afectar física y psicológicamente a las personas [9]. La Organización Mundial de la Salud (OMS), ha reportado que para el año 2050 se prevé que una de cada cuatro personas presente problemas de audición, debido a que las personas se exponen a niveles de ruido que sobrepasan los límites establecidos generando una discapacidad auditiva, dicho problema presenta consecuencias a largo plazo y los daños ocasionados son irreversibles. Por lo que es necesario proporcionar información a las personas, para proponer que las actividades cotidianas que realizan durante sus horas de trabajo o descanso se encuentren reguladas por las normas establecidas.

Una primera acción para contrarrestar este problema consiste en llevar a cabo un estudio de planeación en las ciudades para distribuir y separar zonas industriales, comerciales, recreativas, vialidades de zonas habitacionales y educativas. Una segunda acción sería realizar mediciones de los niveles sonoros en una zona para generar un mapa de ruido y establecer normas para evitar la exposición continua. En consecuencia, desde hace unos años algunos países desarrollados han generado diversos campos de estudio para la planificación en desarrollo urbano, los cuales cuantifican y modelan los niveles de ruido por zonas, además de establecer normas gubernamentales que regulan el impacto a la exposición de las personas a los distintos tipos de ruido que rodean su entorno [10]. Una tercera alternativa es considerar materiales que aíslen o acondicionen acústicamente un recinto con la finalidad de disminuir la propagación del ruido generado por fuentes sonoras externas. De esta manera se han realizado diversos proyectos con áreas multidisciplinarias que involucran el diseño de estructuras y la caracterización de materiales utilizados durante la construcción [10]. Es por esta razón que se utilizan materiales sintéticos que cumplen con las propiedades adecuadas para acondicionar un recinto, sin embargo, el impacto ambiental generado por el proceso de producción y los desechos de estos ha motivado a buscar opciones sustentables que permitan sustituirlos. Los materiales que han adquirido mayor relevancia son las fibras naturales, debido a que son materiales reciclables, de fácil manejo, abundan en la naturaleza, de bajo costo y en algunas ocasiones son productos de desecho. Por esto se han implementado diversas combinaciones de polímeros con distintas fibras naturales con la finalidad de

producir un compósito que presenten una alta resistencia, durabilidad, propiedades térmicas y acústicas para que puedan ser utilizados en aplicaciones de aislamiento acústico.

En este trabajo se presentan los resultados del uso de compósitos de arcilla reforzados con fibras naturales producidas en México, para absorción acústica. Se consideró que los materiales estudiados fueran de bajo costo, sostenibles y amigables con el ambiente, con la finalidad de que puedan ser utilizados como sustituto de materiales sintéticos. Los compósitos fueron caracterizados mediante DRX, microscopía óptica, FT-IR, ATG, ensayos de dureza y densidad aparente para evaluar sus propiedades fisicoquímicas; mientras que las características acústicas se determinaron mediante la técnica de tubo de impedancia con la finalidad de cuantificar los coeficientes acústicos y la respuesta al impulso de los materiales sintetizados.

## **Objetivos**

### **General**

Evaluar las propiedades acústicas de compósitos de arcilla y fibras naturales en función de la composición y la humedad relativa.

### **Específicos**

- Estudiar la síntesis de bentonita y fibras de coco o nopal para obtener compósitos con variaciones en el porcentaje de concentración de las fibras.
- Evaluar las propiedades fisicoquímicas de los compósitos mediante difracción de rayos x (DRX), Microscopía electrónica de barrido (MEB) y análisis termogravimétrico (ATG)
- Determinar los coeficientes acústicos de los compósitos cambiando la composición de las fibras y la humedad relativa.
- Determinar la respuesta al impulso de los compósitos sintetizados.

### **Justificación**

La contaminación acústica es un problema muy común en la actualidad que genera un impacto negativo en la sociedad. Las personas que habitan o trabajan en lugares con altos índices de ruido y están expuestas durante largo tiempo padecen irritabilidad, dolores de cabeza, estrés, ansiedad y en el peor de los casos pérdida auditiva. A nivel mundial se ha

establecido que el límite adecuado de ruido en el exterior de una vivienda debería ser de aproximadamente 65 dB [11], para reducir los daños que este puede ocasionar a largo plazo. En la Ciudad de México, se ha realizado el monitoreo del ruido generado en diversas alcaldías, donde se han registrado niveles de más de 65 dB [12]. Por esta razón, han surgido líneas de investigación centradas en diseñar y sintetizar diversos materiales, capaces de aislar y acondicionar acústicamente los recintos, donde los índices de ruido son muy altos. Los materiales porosos y fibrosos han tomado mayor importancia para contrarrestar este fenómeno [13, 14], debido a que pueden disipar la energía del sonido que incide sobre ellos reduciendo el nivel de ruido. Gracias a que las fibras de coco son un material ligero, de bajo costo y de fácil manejo, se ha generado un interés por usarlas como un sustituto de las fibras sintéticas, ya que presentan propiedades acústicas similares, pero genera principalmente un menor impacto ecológico. Otro tipo de material que ha sido objeto de estudio en México es el nopal, dado que es altamente resistente a la sequía y puede crecer en gran parte del país, lo que hace que su costo de producción sea muy bajo; por tal motivo el estudio de sus fibras en aplicaciones acústicas es una opción como sustituto de fibras sintéticas comerciales. Sin embargo, se sabe que las fibras naturales no presentan propiedades de absorción acústica similares a las de una fibra de vidrio o lana de roca, por lo que, se debe usar una matriz que favorezca al material para mejorar dichas propiedades, una buena opción para matriz sería la bentonita, ya que esta es de origen natural, cuenta con alta porosidad y se puede moldear fácilmente, además de que es muy usada en el campo de la construcción de azulejos, cementos, entre otras aplicaciones, siendo estas propiedades adecuadas para producir un ladrillo absorbente de ruido o un panel acústico. Con base en lo anterior, este proyecto se enfocará en elaborar materiales compuestos de bentonita reforzada con fibras de coco y nopal, con la finalidad de modificar sus propiedades físicas y químicas para determinar la respuesta acústica y evaluar su viabilidad como aislante de ruido.

# **Capítulo 1: Antecedentes y estado del arte**

## 1.1 Sonido

El sonido en física se define como la propagación de una onda mecánica longitudinal en un medio elástico gaseoso, sólido o líquido (en la Figura 2 se muestra un ejemplo de onda longitudinal). La acústica es la rama de la física que se enfoca al estudio de la generación, transmisión y recepción de las ondas vibratorias de la materia con su entorno [15]. Una onda acústica longitudinal periódica ( $P$ ) con una máxima presión de amplitud ( $A$ ), propagándose a lo largo de una distancia ( $x$ ), asociado con el número de onda ( $k$ ), en un tiempo determinado ( $t$ ) y en función de la frecuencia ( $w$ ), está dada por la ecuación 1.

$$P(x, t) = Ae^{j(kx-wt)} \quad (3)$$

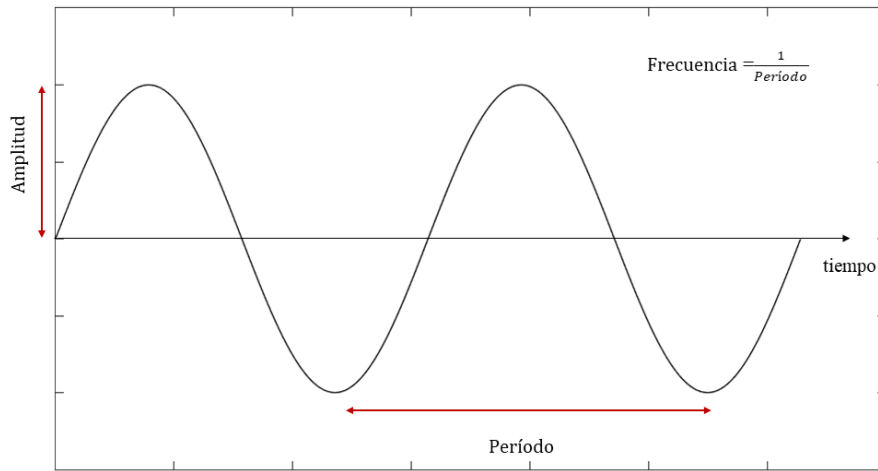


Figura 2. Representación de una onda longitudinal.

El sonido puede ser cuantificado con base en su nivel de presión sonora (NPS) y la unidad de medida para representarlo es el decibel (dB) [15]. Para determinar el nivel de presión sonora que porta la onda acústica en la dirección de propagación se hace uso de la ecuación 2.

$$NPS_{(dB)} = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_0} \right) \quad (4)$$

Donde  $P_0$  es la presión que se toma como referencia,  $20 \mu\text{Pa}$  que es la presión mínima audible percibida por el ser humano en aire, y  $P$  es la presión instantánea registrada. Cabe mencionar que el nivel de presión sonora depende de la dirección en la cual está orientado el micrófono,

además de la distancia entre la fuente y el punto de recepción, de aquí que se pueden presentar diversos valores para una misma fuente de ruido, dependiendo de la orientación y localización. De acuerdo con la Norma Ambiental para el Distrito Federal, el registro del nivel de presión sonora dentro de un recinto se debe realizar conforme al esquema de la Figura 3, el micrófono se debe colocar a una distancia de 1.5 metros de la fuente sonora, a una altura de entre 1.2 y 1.5 m del suelo y a 1 m separado de la pared, el registro se debe realizar con un sonómetro y se recomienda que las ventanas y puertas se encuentren abiertas, para más detalles acerca de este proceso se puede consultar la norma NADF-005-AMBT-2013 [11].

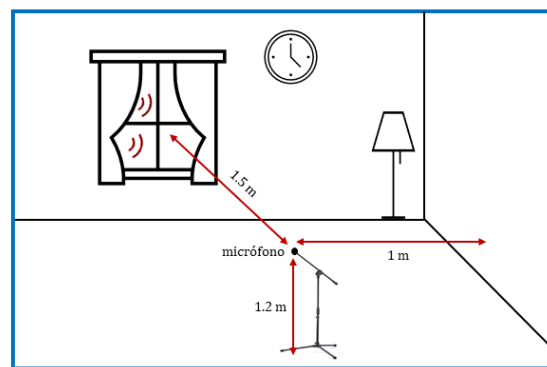


Figura 3. Esquema del registro del nivel presión sonora en un recinto.

A pesar de que existen diferentes tipos de sonidos en el ambiente con características muy particulares e incluso algunos catalogados como molestos, la generación controlada en la propagación, registro y análisis de una onda acústica tiene aplicaciones muy importantes en ingeniería que proporcionan valores cuantitativos del medio donde se propaga [16]. Por ejemplo, una de las características principales del sonido es que su amplitud disminuye en función de la distancia, pero su atenuación es más significativa con el incremento de la frecuencia. Cuando una onda acústica se propaga en un medio en una dirección específica y se presenta un cambio en la impedancia del medio se genera una onda reflejada que puede ser utilizada para determinar propiedades físicas del medio. Ambos escenarios tienen una aplicación muy importante para determinar ciertas características de los materiales con los cuales interacciona la onda sonora. En este sentido, uno de los parámetros comúnmente utilizados para cuantificar las propiedades acústicas de los materiales consiste en medir el tiempo de reverberación ( $TR_{60dB}$ ) en un recinto, el cual describe la permanencia de amplitud

de un sonido hasta decaer 60 dB. En otras palabras, es un parámetro para evaluar de manera cuantitativa la calidad acústica del recinto. El esquema de la Figura 4 muestra las ondas generadas por una fuente sonora en un espacio, en la gráfica se representa el decaimiento de la intensidad del sonido que permite identificar el tiempo de reverberación en el recinto.

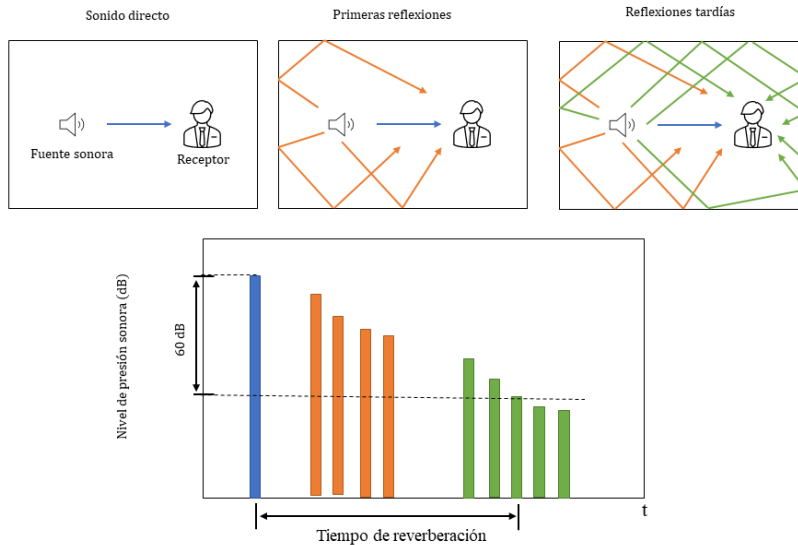


Figura 4. Representación del tiempo de reverberación de un recinto.

Este parámetro fue definido por W. Clement Sabine [12] y consiste en una expresión matemática que involucra las propiedades de absorción acústica de los materiales, dada como:

$$TR_{60dB} = \frac{0.163V}{\sum_i S_i \alpha} \quad (5)$$

Donde  $V$  representa el volumen del espacio,  $S_i$  la superficie  $i$ -ésima de cada material con el cual está edificado y  $\alpha$  denota el coeficiente de absorción a una frecuencia específica. Por lo que determinar las propiedades absorbentes de los materiales cuantifica la calidad acústica del recinto.

El parámetro más utilizado en ingeniería acústica es el nivel de presión sonora equivalente ( $L_{PAeq}$ ), el cual cuantifica la cantidad de ruido percibido en un punto durante un intervalo de tiempo. Cuando el ruido percibido en un punto se integra por varias fuentes acústicas se hace referencia al nivel de presión sonora para cuantificar un nivel continuo equivalente que produciría la misma energía sonora en un intervalo de tiempo, definido como:

$$L_{pAeq} = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \int_0^T \left( 10^{\frac{L_{PA}}{10}} \right) dt \quad (6)$$

Donde  $L_{PA}$  es la presión sonora instantánea registrada a lo largo de un tiempo  $T$ . El parámetro  $L_{pAeq}$  se utiliza para caracterizar las diferentes fuentes sonoras, como se muestra en la Tabla 1, definiendo escenarios nocivos al ser humano cuando se rebasa los 65 dB [11].

Tabla 1. Nivel de intensidad del sonido [17].

Fuente sonora	nivel de presión sonora (dB)
Avión despegando	140
Martillo neumático	130
Sirena de tren, alarma de incendio	125
Concierto de rock, taladro (riesgo de lesión auditiva si la exposición se prolonga 7 minutos)	120
Discoteca, petardos pirotecnia (riesgo de daño inmediato)	110
Sierra eléctrica, cascos de música (riesgo de lesión si la exposición se prolonga 2 horas)	95
Motocicleta (riesgo de lesión auditiva si la exposición se prolonga durante 4 horas) Claxon de un automóvil	90
Tráfico rodado en la ciudad	80-85
Conversación acalorada (oficina)	80
Aspiradora	65
Lavavajillas	60
Conversación normal	50/60
Zonas residenciales	40
Murmullo oleaje suave en la costa	30
Rumor de hojas de árboles	20
Pájaros trinando	10

## **1.2 Ruido**

El ruido se puede definir como aquel sonido percibido por una persona que le ocasione una sensación desagradable, molestia o perturbación, considerando que el rango de frecuencia audible para el ser humano se encuentra entre los 20 y 20000 Hz. Las cualidades principales para que un sonido se identifique como ruido se basan en la energía sonora y el tiempo de duración. De aquí que entre más altos son los niveles de ruido y el tiempo de exposición, mayor molestia causará.

El ruido se puede clasificar en tres tipos dependiendo de las características que este posee:

- i) Estacionario que se caracteriza por un nivel de presión sonora constante durante periodos de tiempo prolongados, por ejemplo, en una empresa donde se tienen máquinas generando ruido constante.
- ii) No estacionario el cual presenta variaciones de presión sonora durante un intervalo de tiempo, por ejemplo, el ruido generado dentro del metro en horas pico, el pasar de vehículos por una avenida transitada, entre otros.
- iii) Impulsivo que se caracteriza por un nivel de ruido muy alto en un instante de tiempo muy corto, por ejemplo, un trueno, la caída de un objeto pesado, el estallido de un globo, etc.

Para proponer soluciones y contrarrestar el tipo de ruido es necesario analizar el tipo de ambiente que rodea el espacio de estudio y cuantificar los niveles sonoros.

### **1.2.1 El efecto nocivo del ruido en la salud**

En diversos estudios se ha reportado que la exposición de una persona a altos niveles de ruido por tiempos prolongados puede provocar daños fisiológicos y/o psicológicos como lo son: discapacidad y fatiga auditiva, dolor de oído y/o cabeza, reducción del rendimiento en las actividades cotidianas, estrés, irritabilidad y algunos efectos cardiovasculares [4, 5, 6, 7, 8].

Uno de los principales efectos nocivos registrado en los últimos años son la pérdida de la capacidad auditiva de las personas, ya sea porque trabajan en lugares con maquinaria ruidosa como en el caso de construcciones o fábricas industriales, viven cerca de carreteras o avenidas donde hay un constante flujo vehicular, habitan en sitios rodeados de lugares donde se escucha música a alto volumen, uso constante de auriculares o que acuden a recintos donde

los niveles de ruido sobrepasan el nivel máximo permitido [5, 6. 8]. La Tabla 2 muestra una perspectiva de los daños causados por la exposición a diferentes niveles de sonido.

*Tabla 2. Efectos sobre la salud de la exposición a diferentes niveles de sonido [18].*

<b>Entorno</b>	<b>Nivel de sonido (dB)</b>	<b>Tiempo (h)</b>	<b>Efecto sobre la salud</b>
Exterior de viviendas	50-55	16	Molestia
Interior de viviendas	35	16	Interferencia con la comunicación
Dormitorios	30	8	Interrupción del sueño
Aulas escolares	35	Duración de la clase	Perturbación de la comunicación
Áreas industriales, comerciales y de tráfico	70	24	Deterioro auditivo
Música de auriculares	85	1	Deterioro auditivo
Actividades de ocio	100	4	Deterioro auditivo

### **1.2.2 Recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud**

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) “aproximadamente el 50% de la población de entre 12 y 35 años –es decir, 1 100 millones de jóvenes– predispone el riesgo de perder audición como consecuencia de una exposición prolongada y excesiva a sonidos fuertes, como la música que escuchan en sus dispositivos de audio personales” [19]. Con base en estos datos la OMS hace las siguientes recomendaciones para reducir la pérdida auditiva de las personas:

- Mantenerse alejados de lugares ruidosos. El máximo nivel de ruido permisible en el área de trabajo debe ser 85 dB durante un periodo de 8 horas.
- En el caso de acudir a un lugar que exceda los 85 dB como bares, discotecas, estadios, etc., se recomienda el uso de tapones para los oídos dado que estos pueden reducir el nivel del ruido de 5 a 45 dB.
- El uso de dispositivos con función de “tolerancia sonora”, la cual es una aplicación que advierte al usuario que el nivel y tiempo de exposición a un sonido es dañino.

### **1.2.3 Regulaciones del ruido en la Ciudad de México**

En la Ciudad de México se cuentan con algunos lineamientos para regular el ruido en establecimientos mercantiles, como lo son la Norma Ambiental para el Distrito Federal (NADF-005-AMBT-2013) y la Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal, las cuales establecen que los límites máximos de emisión de ruido permitido en los domicilios o recintos, son de 65 dB en un horario de 6:00 a 20:00 horas y 62 dB de 20:00 a 6:00 horas [20, 11]. La dependencia gubernamental que está a cargo de esta regulación es la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT) y en caso del incumplimiento de los lineamientos, esta puede suspender las actividades de los establecimientos denunciados e informar a la Secretaría de Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA) para sancionar a los responsables [21].

### **1.3 Coeficientes acústicos**

Las propiedades acústicas de un material se determinan con el propósito de acondicionar y contrarrestar los niveles de ruido. Para ello es necesario usar una onda acústica, con características definidas en forma, amplitud y frecuencia, que permita realizar una comparación entre lo que se genera y la respuesta del material. El fenómeno físico que se presenta después de que una onda incidente impacta de manera perpendicular la superficie del material, es la generación de una onda reflejada y una onda transmitida propagándose en una dirección opuesta e igual a la de la onda incidente, respectivamente. En este caso la onda acústica absorbida por la estructura del material es disipada en forma de calor o deformación permanente. La Figura 5 muestra el diagrama esquemático de las direcciones de las ondas acústicas generadas, donde se representan la presión de la onda acústica incidente ( $P_i$ ), la cual después de incidir con el material genera una onda reflejada, ( $P_r$ ) y transmitida ( $P_t$ ), mientras que ( $\alpha$ ) representa la absorción acústica del material.

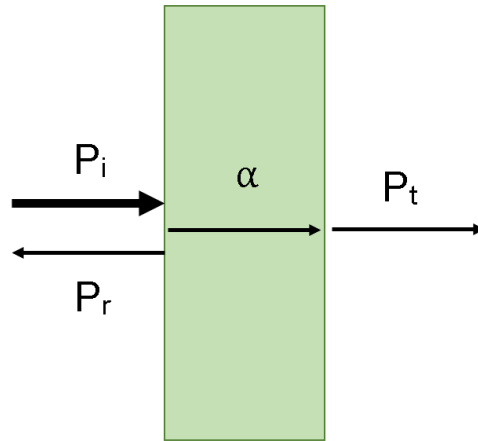


Figura 5. Representación esquemática de las direcciones de las ondas acústicas.

Dependiendo de las propiedades físicas del material se definirá la cantidad de energía reflejada, transmitida o absorbida, las cuales se representan matemáticamente como:

Onda acústica incidente:

$$P_i(x, t) = A_i e^{j(kx \pm \omega t)} \quad (7)$$

Onda acústica reflejada:

$$P_r(x, t) = A_r e^{j(kx \pm \omega t)} \quad (8)$$

Onda acústica transmitida:

$$P_t(x, t) = A_t e^{j(kx \pm \omega t)} \quad (9)$$

De esta manera se puede cuantificar la amplitud de presión acústica incidente ( $A_i$ ), reflejada ( $A_r$ ) y transmitida ( $A_t$ ) que porta cada una de las ondas para analizar sus propiedades en función de la frecuencia ( $\omega$ ), las cuales definen los coeficientes acústicos.

El coeficiente de reflexión acústico ( $R$ ) representa la magnitud de la presión de onda reflejada respecto a la onda incidente definida como:

$$|R| = \left| \frac{P_r(x,t)}{P_i(x,t)} \right| \quad (10)$$

El coeficiente de transmisión acústico ( $T$ ) representa la magnitud de la presión de onda transmitida respecto a la onda incidente dada como:

$$|T| = \left| \frac{P_t(x,t)}{P_i(x,t)} \right| \quad (11)$$

Considerando la conservación de energía acústica y recordando que la intensidad de una onda sonora es directamente proporcional al cuadrado de la amplitud, entonces la magnitud del coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) se obtiene de manera indirecta entre la magnitud del coeficiente reflejado  $|R|$  y transmitido  $|T|$  expresada como:

$$\alpha = 1 - |R|^2 - |T|^2 \quad (12)$$

Con base en principio de conservación de energía, respecto a la amplitud de presión de onda incidente, los coeficientes acústicos presentan una magnitud adimensional entre 0 y 1. En el campo de estudio de las propiedades acústicas de los materiales, el cuantificar los coeficientes acústicos, en el dominio de la frecuencia, describe el comportamiento para clasificar un material como reflejante cuando el coeficiente de reflexión es mayor que el de absorción y absorbente en el caso opuesto.

#### **1.4 Tubo de impedancias**

El tubo de impedancias es una de las técnicas más comunes para determinar las propiedades acústicas de cualquier material, este puede ser por incidencia normal o directa. A través de esta se puede determinar si el material estudiado sirve para su uso en aplicaciones de aislamiento o acondicionamiento acústico.

En la figura 6 se muestran los componentes principales de un tubo de impedancias los cuales son: las cámaras acústicas (el tubo), el porta muestras, el respaldo, la fuente sonora y los micrófonos. El tubo debe ser rígido y liso con la finalidad de generar ondas planas y evitar que estas se reflejen generando superposiciones, el diámetro y la longitud del tubo son propiedades importantes que se deben considerar, ya que estos influyen en el rango de frecuencias en la que opera el equipo, por lo que para realizar la construcción de un tubo de impedancias se debe considerar la norma ISO 10534-2. La fuente sonora sirve para generar las ondas en el rango de frecuencias que se desea estudiar. Los micrófonos se utilizan para

registrar las ondas reflejadas y transmitidas por el material, por lo que estos deben contar con una respuesta acústica adecuada. El respaldo dependerá de la configuración del tubo de impedancia, en el caso de que se determine la respuesta acústica en términos de la reflexión acústica, la terminación del equipo debe ser un material altamente reflejante para que no se transmita el sonido y en el caso donde se debe considerar determinar la respuesta acústica en términos de la reflexión y transmisión, la terminación del tubo debe ser un material absorbente para evitar la superposición de señales que se generan al chocar con el respaldo del tubo [22, 23].

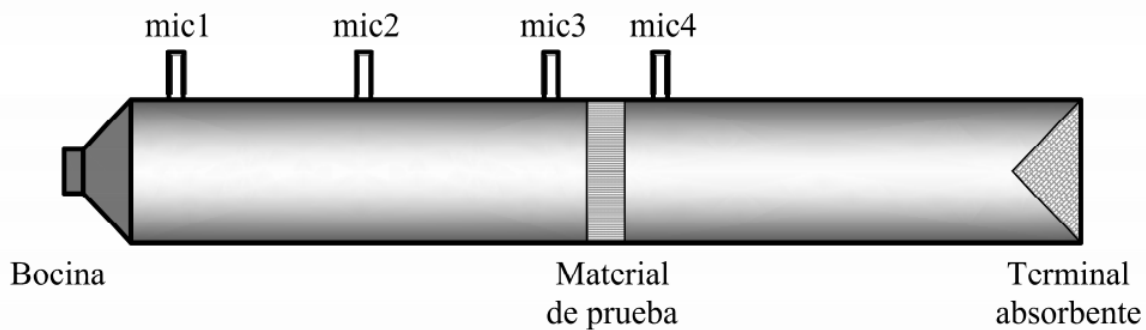


Figura 6. Esquema de un tubo de impedancias.

### 1.5 Respuesta al impulso

La respuesta al impulso, en el dominio del tiempo, es un modelo matemático que se utiliza para estimar la respuesta de un sistema ante una señal de entrada y con ello analizar sus propiedades. La respuesta al impulso de un sistema es de utilidad en la acústica arquitectónica para modelar espacios en los cuales se requiere de una particular propagación del sonido. De esta manera se define el estudio de un esquema de respuesta impulso finita, en el cual la salida  $y[n]$  se obtiene mediante la convolución de la entrada  $x[n]$  con la respuesta al sistema  $h[n]$ , la Figura 7 muestra el diagrama que representa este proceso matemático.

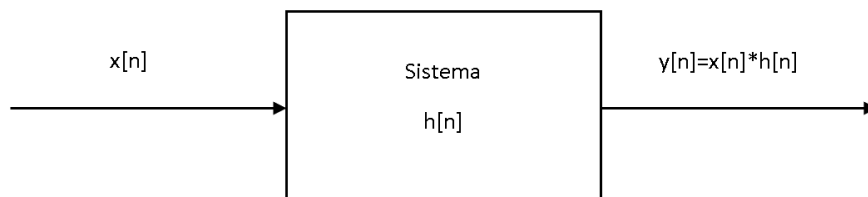


Figura 7. Diagrama a bloques de la respuesta al impulso de un sistema.

La finalidad para obtener esta señal característica de un material, que se considera como su huella en el dominio del tiempo, es la de poder realizar un modelo que permitan analizar el comportamiento acústico del material en distintos entornos y así hacer una evaluación previa de su uso como aislante o absorbente acústico.

## **1.6 Fundamento de las técnicas de caracterización fisicoquímica**

### **1.6.1 Difracción de rayos X (DRX)**

La difracción de rayos X es una técnica de caracterización cualitativa y cuantitativa que permite determinar la estructura cristalina, parámetros de red y tamaño de cristal en un material, así como, su composición mineralógica. Esta se basa en la interacción de un haz de rayos X con un material, el cual produce la dispersión del haz en ángulos específicos para identificar distintos planos cristalográficos de la muestra [24].

Los rayos X son radiación electromagnética de longitud de onda entre los 0.1 y 10 nm. Estos son producidos cuando un haz de electrones es acelerado por una diferencia de potencial alta, normalmente de 50 kV. La colisión de estos electrones con los electrones orbitales del blanco metálico genera vacancias en su capa electrónica, las cuales son llenadas por electrones que se encuentran en capas de mayor energía, este proceso genera la emisión de un fotón de rayos X característico, el cual dependerá de las transiciones electrónicas generadas. En esta técnica normalmente se utilizan transiciones generadas en las líneas del nivel k, las cuales corresponden a  $k_{\alpha 1}$ ,  $k_{\alpha 2}$  y  $k_{\beta 1}$  con una longitud de onda aproximada de 0.709, 0.71 y 0.638 Å respectivamente, ya que estas contienen información relacionada con las distancias interplanares de la mayoría de los sólidos cristalinos estudiados [24].

Cuando un haz de rayos X incide sobre un material, provocará que los átomos que lo conforman se dispersen produciendo un fenómeno de interferencia que para determinadas direcciones de incidencia será destructivo y para las otras constructivo surgiendo así el fenómeno de difracción (Figura 8).

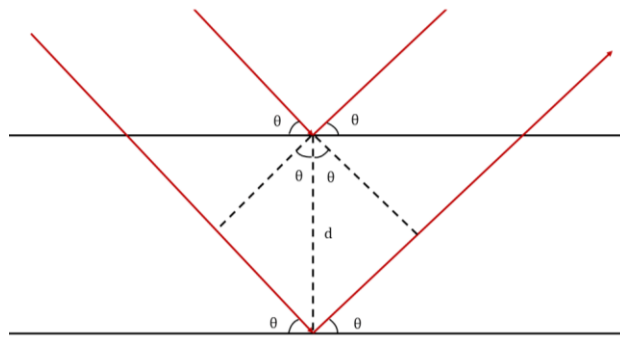


Figura 8. Interacción del haz de rayos x con un cristal.

La difracción se puede determinar a través de la ecuación de la ley de Bragg:

$$n\lambda = 2d\text{sen}\theta \quad (13)$$

Donde  $n$  es el orden de reflexión (número entero),  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X,  $d$  es la distancia interplanar de la red cristalina y  $\theta$  es el ángulo de incidencia del haz [25]. Cuando el haz generado es difractado por un plano paralelo dentro del material cumpliendo con la ley de Bragg, se observara una interferencia constructiva denominada pico de difracción, el conjunto de estos picos genera un patrón característico de la estructura cristalina del material, los cuales pueden relacionarse con planos de átomos para ayudar a analizar la estructura atómica y la microestructura de una muestra [24].

El tamaño promedio de cristal ( $\tau$ ) se puede determinar a través de la ecuación de Scherrer [24]:

$$\tau = \frac{k \lambda}{B \cos\theta} \quad (14)$$

Donde  $k$  es un factor que depende de la forma del cristal, el cual tiene un valor de 0.9,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación,  $\beta$  es determinado del ancho medio altura del pico experimental y  $\theta$  es el ángulo de incidencia. En esta ecuación se establece que los picos más definidos corresponden a partículas cristalinas más grandes, mientras que los picos más anchos son debidos a muestras amorfas y diminutas [24].

### 1.6.2 Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)

Mediante la espectroscopia FT-IR se obtiene información sobre la presencia o ausencia de grupos funcional en una muestra. En esta técnica la radiación infrarroja induce vibraciones moleculares generando distintas bandas de absorción o transmisión específicas de un

material, con las cuales se identifica la huella dactilar de una muestra. Las vibraciones moleculares más fuertes son debidas a enlaces covalentes y se pueden tener de distintos modos de vibración como estiramiento, balanceo y tijera (Figura 9). Las bandas que proporcionan más información en un espectro infrarrojo corresponden a las frecuencias de estiramiento. El rango de absorción IR para enlaces covalentes se encuentra entre los 600 a 4000  $\text{cm}^{-1}$  y longitudes de onda de 2.5 a 25  $\mu\text{m}$  [24].

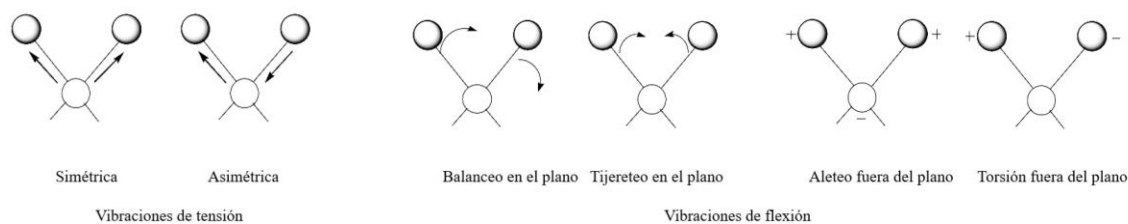


Figura 9. Tipos de vibraciones moleculares

Un espectrofotómetro FTIR está compuesto por una fuente, un interferómetro, un detector, un espejo fijo y otro móvil (Figura 10). La fuente emite una radiación que llega al divisor de haz, el 50% del haz se refleja en el espejo fijo y el otro 50% se transmite en el espejo móvil, después el haz pasa por el divisor nuevamente para atravesar la muestra y ser registrada por el detector, con esto se genera un patrón de interferencia que dependerá del rango de radiación del haz incidente, posteriormente se hace uso de la transformada de Fourier para obtener el espectro infrarrojo de la muestra [24].

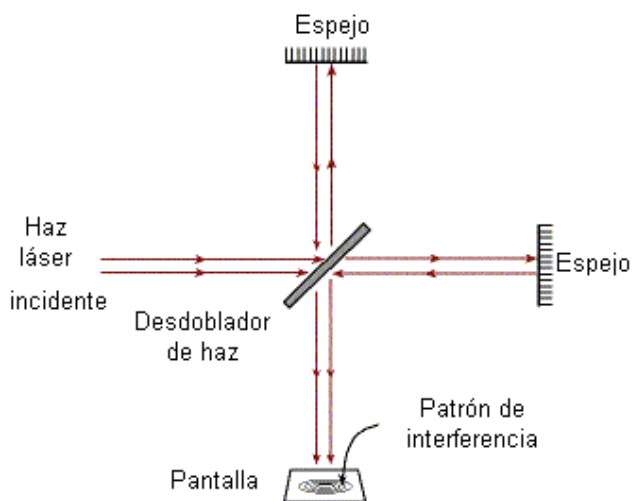


Figura 10. Diagrama interior de un espectrofotómetro FTIR.

El espectro FTIR es una gráfica que representa cuáles son las de frecuencias transmitidas (o absorbidas) por la muestra estudiada, en el eje x se tiene el número de onda que corresponde a las frecuencias con unidades de centímetros inversos y en el eje y se tiene la intensidad en unidades porcentuales. Las bandas de infrarrojos se pueden clasificar como débiles medias o fuertes, con base en las intensidades relativas en el espectro. Las bandas fuertes son aquellas que cubren la mayor parte del eje y, una banda débil se encontraría por debajo de la tercera parte del eje y. A través de vibraciones generadas por la radiación infrarroja, se logran identificar los enlaces químicos de las distintas moléculas, los cuales se pueden asociar con diversos grupos funcionales que permiten determinar la composición de la muestra [24].

### **1.6.3 Microscopía electrónica de barrido (MEB)**

La microscopía electrónica de barrido utiliza un haz de electrones que inciden sobre un material, donde a través de un detector se recogen las señales emitidas por la interacción para crear una imagen topográfica de alta resolución, que proporciona información sobre las características superficiales del material [24].

El microscopio electrónico de barrido está compuesto principalmente por el cañón de electrones, la columna, la cámara porta especímenes, el sistema de vacío y los detectores (Figura 11). El cañón de electrones se utiliza para producir un haz de electrones fino y controlado, este puede ser un cañón termoiónico o un cañón de emisión de campo. En la columna se encuentra distintas lentes electromagnéticas cuyo principal objetivo es alinear y enfocar el haz de electrones en la superficie de la muestra. La cámara porta especímenes es el lugar donde se coloca la muestra a analizar. El sistema de vacío tiene la finalidad de evitar que los electrones se dispersen y prolongar la duración de la fuente de emisión electrones. Los detectores son utilizados para obtener información topológica y química de la superficie de la muestra [24].

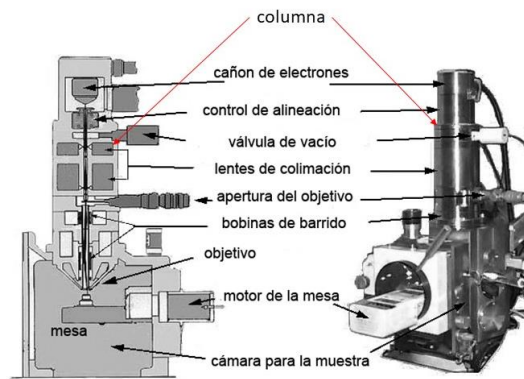


Figura 11. Diagrama esquemático de un microscopio electrónico de barrido

La interacción del haz de electrones con la superficie de la muestra (Figura 12) puede producir distintas señales, entre las que se incluyen fotones, electrones secundarios, retrodispersados y Auger. Para generar imágenes del microscopio electrónico de barrido solo se requieren de dos tipos: los secundarios los cuales proporciona una imagen de alta resolución en blanco y negro de la topografía de la superficie examinada y los electrones retrodispersados que generan una imagen de menor resolución, pero con una mayor sensibilidad a los elementos presentes en la superficie, representándolos con distintas tonalidades en escala de grises [24].

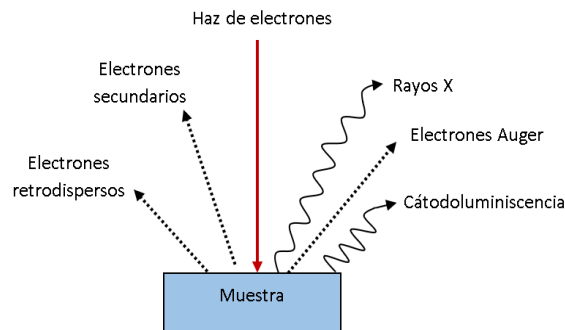


Figura 12. Interacciones entre el haz de electrones y la muestra

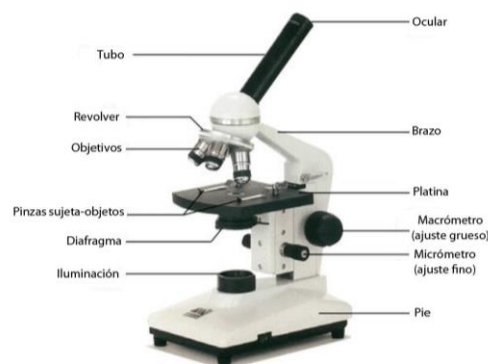
#### 1.6.4 Microscopía óptica (MO)

La microscopía óptica es una técnica que permite visualizar estructuras de tamaños micrométricos, gracias a un sistema de lentes y la interacción de la luz con la muestra. A través de esta técnica se pueden obtener imágenes de la microestructura de un objeto, la resolución del microscopio óptico dependerá del lente ocular y los lentes objetivos del equipo, la resolución máxima que puede tener es de  $0.2 \mu\text{m}$  [24].

La Figura 13 muestra las partes de un microscopio óptico, este compuesto por una mecánica y otra óptica:

La parte mecánica es la encargada de darle mayor estabilidad a la parte óptica, la cual está compuesta por: el pie que es la base que sirve para sostener el microscopio, este normalmente es muy pesado, el brazo que es el que da soporte al tubo y la platina, el tubo donde se encuentran los dos lentes, el ocular y objetivo, la platina que es el lugar donde se coloca la muestra a analizar y los tornillos macrométrico y micrométrico, que sirven para enfocar la muestra.

La parte óptica es la encargada de generar la imagen de la muestra estudiada la cual está compuesta por: la fuente luminosa, el condensador que es el que recibe la luz de la fuente y la intensifica, el lente objetivo que es el más cercano a la muestra y sirve para concentrar la luz y enfocar el área deseada, la lente ocular es la que se encuentra en la parte superior y que permite al observador ver la muestra, el diafragma el cual se encarga de regular la cantidad de luz generada por la fuente y el porta filtro, es el lugar donde se coloca un filtro con la finalidad de obtener una luz más natural y homogénea.



*Figura 13. Esquema de las partes del microscopio óptico.*

La imagen de un microscopio óptico es generada por la transmisión de luz a través de un objeto, donde gracias a los lentes convergentes el haz luminoso se proyecta sobre la muestra y con ayuda del lente objetivo se recoge la luz que atraviesa la muestra proyectando una imagen real y aumentada de esta, la cual se puede observar mediante el lente ocular o en una imagen digital a través de una pantalla [24].

### 1.6.5 Análisis termogravimétrico (ATG)

El análisis termogravimétrico utiliza calor para forzar reacciones y cambios físicos de distintos materiales en una atmosfera controlada. Esta técnica realiza una medición cuantitativa del cambio de masa en una muestra debido a procesos de deshidratación, oxidación y descomposición en función de la temperatura y el tiempo, las cuales dependerán de la estructura molecular de la muestra [24].

Los principales componentes de un equipo para realizar ATG, Figura 14, son el porta muestras el cual debe ser de un material que no influya en la transferencia de calor, normalmente se usan platino, aluminio u alúmina, el control de temperatura que permite regular la velocidad con la que aumenta la temperatura, es común usar velocidades de 20 o 10 ° C por minuto, la termobalanza que se encarga de registrar el peso de la muestra con el aumento de la temperatura, los sensores de temperatura, una computadora que procese los datos obtenidos y un cámara que permita controlar la atmosfera, el nitrógeno es el gas más utilizado para purgar muestras en ATG debido a su naturaleza inerte, sin embargo también se suelen usar helio, dióxido de carbono y aire [24].

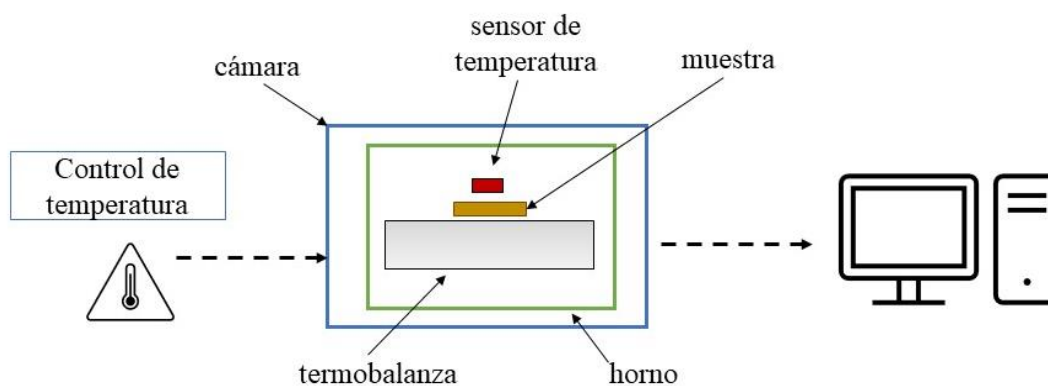


Figura 14. Diagrama esquemático de los principales componentes de un equipo ATG.

La termogravimetría es una técnica en la cual se registra el cambio en el peso de una muestra al ir aumentando la temperatura en función del tiempo, esta proporciona una gráfica que permite identificar si las pérdidas son debidas a la deshidratación, oxidación o descomposición de la muestra [24].

### **1.6.6 Ensayo de dureza Shore**

La dureza es una propiedad de los materiales que mide la resistencia de este al aplicar una fuerza en un punto específico, con la cual se puede tener una idea aproximada de las propiedades mecánicas de un material. Existen diferentes pruebas para medir la dureza de un material, entre los más comunes se tiene el de Rockwell, Vickers, Brinell, Shore y Knoop,

El durómetro es uno de los equipos más usados para medir la dureza de Shore, debido a que es un método rápido. Consiste en colocar una muestra en una superficie rígida y presionar un indentador o penetrador sobre la superficie del material de prueba, hasta que este se nivele con la base del equipo, la profundidad del indentador mide la dureza en una escala de 0 a 100. Los resultados varían dependiendo de la fuerza que se aplique al penetrador, por lo que, se recomienda realizar mediciones en distintos puntos de la muestra y realizar el promedio de los datos obtenidos.

### **1.7 Materiales para aislamiento acústico**

El aislamiento acústico consiste en reducir el nivel de ruido producido en el exterior de un recinto mediante el uso de algún material muy denso y con un alto coeficiente de reflexión. En el campo de la acústica arquitectónica, se ha observado que los materiales porosos y fibrosos son una opción para disminuir el ruido exterior, ya que debido a sus propiedades pueden absorber el sonido y su aplicación como un recubrimiento de las paredes, suelos o techos crean un confort acústico dentro de lugar donde son colocados [13].

#### **1.7.1 Sintéticos**

Los materiales porosos son los mejores absorbentes de sonido debido a que al hacer incidir una onda acústica sobre estos, el sonido empezará a viajar a través de sus intersticios y se generarán movimientos vibratoriales de amortiguamiento al chocar con estos, haciendo que el sonido disipe en forma de calor, generando la reducción de la intensidad del sonido y en el mejor de los casos evitando que se refleje o transmita, significativamente.

Los materiales porosos de origen sintético de mayor uso comercial son la lana de vidrio, lana de roca y espuma de poliestireno debido a que son materiales con coeficientes de absorción muy cercanos a 1 para un amplio rango de frecuencias [13]. En la Tabla 3 se presentan las

propiedades acústicas de distintos materiales sintéticos que se han reportado en los últimos años.

*Tabla 3. Resumen de estudios sobre materiales sintéticos utilizados como absorbentes acústicos [13, 26].*

<b>Muestra</b>	<b>Resultados obtenidos</b>
Lana de vidrio	La muestra presentaba un coeficiente de absorción mayor a 0.8 en un rango entre los 1000 a los 5000 Hz. Al aumentar espesor de la muestra se tenía una mejora de la absorción para bajas frecuencias
Fibra de poliuretano termoplástico	El coeficiente de absorción del poliuretano era mayor a 0.9 en el rango de 2000 a 4000 Hz.
Fibra de poliéster reciclada	Presento una absorción acústica promedio del 0.7 para el rango de frecuencias de los 50 a 5000 Hz.
Lana de roca	El coeficiente de absorción acústica de la muestra se mantuvo por encima de los 0.8 desde los 1000 Hz hasta alcanzar los 5000 Hz.
Espuma de poliuretano con fibras de lana de roca	El uso de refuerzo de fibras de lana de roca mejoraba las propiedades de absorción acústica para bajas frecuencias, aproximadamente en el rango de los 400 a los 1600 Hz.

### **1.7.2 Naturales**

En las investigaciones realizadas en los últimos años se han buscado diversos materiales que presenten adecuadas propiedades de absorción acústica, pero que a su vez su proceso de producción tenga un menor impacto ecológico, por lo que se han estudiado las propiedades acústicas de algunos tipos de fibras naturales, muchas de ellas consideradas desechos y/o que son abundantes, como: coco, kenaf, caña, maguey, entre otras [14]. En la Tabla 4 se presenta un resumen de los resultados reportados para algunas fibras naturales.

Tabla 4. Resumen de estudios sobre fibras naturales utilizadas como absorbentes acústicos [13, 14, 27].

Muestra	Resultados obtenidos
Fibra de ramio	El material presenta propiedades de absorción acústica mejores que una estructura tipo sándwich de fibra de vidrio.
Fibras de luffa	Las muestras presentan un alto coeficiente de absorción a pesar de tienen un espesor pequeño.
Fibra de kapok y algodóncillo	Las fibras tienen buenas propiedades para aislamiento térmico y acústico.
Fibra de cascara de maíz	La cascara de maíz tratada con un 2% y 5% de NaOH presentan un coeficiente de absorción cercano a 1 para el rango de frecuencias entre 1600 y 3250 Hz.
Fibra de la hoja de piña	La muestra de 20 mm de espesor presentaba un coeficiente de absorción de 0.9 en la frecuencia de 2 kHz, mientras que la de 30 mm obtuvo 0.8 para 1 kHz. Dado que el proceso de producción de la fibra de hoja de piña es más ecológico, esta podría ser usada como aislante acústico.
Fibra de racimo de fruta de palma de aceite	Las muestras con espesores de 4 y 5 cm presentan una absorción acústica promedio de 0.9 a partir de la frecuencia de 1000 Hz.
Fibra de kenaf	Al duplicar la densidad de la muestra de 50 kg/m <sup>3</sup> se obtuvo una mejora del coeficiente de absorción en el rango de 200 a 2000 Hz.
Fibra de madera	La fibra de madera con un espesor de 60 mm presenta un buen coeficiente de absorción para el rango entre los 500 y 1650 Hz.
Fibra de coco	Las muestras presentaban una mayor absorción acústica en el rango de frecuencias entre los 2500 y 3100 Hz. La fibra de coco se puede usar en aplicaciones acústicas, pero sólo tendrá buenos resultados para altas frecuencias.

### 1.7.3 Compósitos

Los compósitos son materiales que han destacado en el campo de la acústica, dado que se ha observado que el uso de polímeros reforzados con fibras sintéticas o naturales presentan propiedades de absorción acústica superiores a los precursores, además de reducir el costo

de producción. En la Tabla 5 se muestran algunos de los compósitos que se han estudiado desde hace algunos años y los principales resultados obtenidos.

Tabla 5. Resumen de estudios sobre compósitos utilizados como absorbentes acústicos [13, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41].

Compósitos utilizados	Resultados obtenidos
Resina epóxica con fibra de luffa	Entre menor sea la concentración de la resina y mayor porcentaje de la fibra, el compuesto tendrá una mejor absorción acústica.
Arcilla con residuos de polvo de cáscara de papa	El uso del 7% en proporción de polvo de cascara de papa, aumenta la porosidad de los ladrillos de arcilla y con esto se mejoran las propiedades de aislamiento acústico del material en un 18%.
Arcilla con cáñamo	La muestra con densidad de $195 \text{ kgm}^{-3}$ obtuvo un coeficiente de absorción mayor 0.9 en un rango aproximado entre los 900 a 1200 Hz.
Arlita y perlita con poliuretano	La perlita tiene un mejor coeficiente de absorción que la arlita. La muestra con una densidad de $154 \text{ g/cm}^3$ presenta una absorción mayor a 0.8 en el rango de frecuencias entre 2000 y 3200 Hz.
Perlita con huso japonés	El compósito de perlita seca y huso obtuvo un coeficiente de absorción acústica superior a 0,8 entre 200 y 1000 Hz
Poliuretano termoplástico (TPU) con laponita	Al agregar una cantidad controlada de relleno de laponita a la matriz de TPU se obtuvo una mejora en el aislamiento acústico de un piso flotante sin generar un aumento significativo en el peso total.
Aerogeles de acetato de polivinilo (PVA), nanoarcilla (bentonita) y oxido de grafeno	La incorporación del óxido de grafeno en la matriz de PVA / nanoarcilla disminuyó el diámetro de poro del material, con lo que se tuvo una mejora en las propiedades de absorción acústica.
Arcilla con lodo de papel	La muestra con un tamaño de grano de 2.5 a 5 mm y con un contenido del 70% de lodo de papel, mostro un coeficiente de absorción mayor que la de un panel acústico comercial.
Arcilla cocida con residuos de fibra de celulosa.	El uso de 15% en peso de residuos de fibra de celulosa mejoro la porosidad y conductividad térmica en el material.
Arcilla reforzada con PET	Los compuestos a base de PET registraron una mejora del 8% en la conductividad térmica y el 3% en la capacidad calorífica específica en comparación con las muestras con aditivos poliméricos de polietileno de alta densidad.

Arcilla reforzada con carbón vegetal	La muestra con 30% de carbón vegetal y una cocción a 1100 °C presento las mejores propiedades termoacústicas.
Residuos de corcho con cenizas volantes-metacaolín	El compuesto que contiene 80% en volumen de corcho presentaba un coeficiente mayor a 0.5 a partir de los 1000 Hz.
Agregados de ladrillos de arcilla reciclada y arcilla calcinada	La adición de arcilla calcinada para reemplazar el cemento en la mezcla ayudó a mejorar las propiedades de resistencia a la compresión de los ladrillos.
Fibra de sisal con resina de poliéster insaturado reforzada con nanotubos de carbono de paredes múltiples.	La adición de nanotubos de carbono de paredes múltiples en el compósito desplazó el pico del coeficiente de absorción acústica a frecuencias mayores a 3150 Hz.
Hormigón a base de arcilla con un resonador de ácido poliláctico	Al incrustar un resonador de ácido poliláctico en el hormigón, se aumentó el coeficiente de absorción acústica del material y se obtuvo un cambio de frecuencia en el pico de absorción acústica correspondiente a las frecuencias altas.

## 1.8 Arcillas

Una arcilla es una roca sedimentaria compuesta de partículas minerales de tamaño microscópico entre los que se encuentran, silicatos hidratados de aluminio, hierro o magnesio, con un cierto grado de impureza; las propiedades físicas y químicas de estas dependen de su estructura cristalina y de su tamaño de grano.

La estructura atómica de las arcillas presenta un arreglo tridimensional, compuesto de planos de hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) y oxígeno (O) enlazados a elementos como el aluminio (Al), magnesio (Mg), silicio (Si), entre otros cationes, formando capas tetraédricas de silicio y octaédricas de magnesio o aluminio enlazadas con los oxígenos e hidroxilos como se observa en la Figura 15 [42].

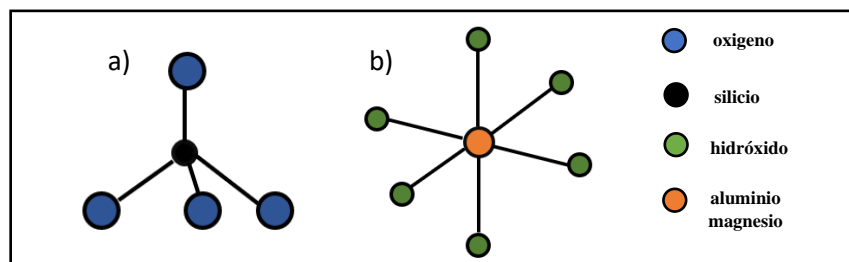


Figura 15. Estructura atómica de las arcillas (a) tetraédrica y (b) octaédrica.

Las arcillas en su mayoría son productos de origen natural, si se mezclan con agua adquieren propiedades plásticas que permiten moldearlas fácilmente, son resistentes al aumento de temperatura, después de secarse se vuelven un material sólido. Algunas arcillas son altamente porosas y al ser un material transpirable se regula la humedad.

Las arcillas tienen diversas aplicaciones a consecuencia de sus propiedades, principalmente se ocupan en el campo de la construcción para la producción de ladrillos, pero en los últimos años se han estado usando en distintas aplicaciones como: estabilizadores de pigmentos naturales, materiales para absorción térmica y acústica, eliminación de metales pesados y tintes, aislantes eléctricos, adsorbentes en procesos de tratamiento de aguas residuales, fotocatalizadores, entre otros [37, 43, 44, 45, 46, 47]; esto es debido principalmente a que el uso de arcillas hace que los materiales se vuelvan más amigables con el ambiente y de bajo costo, por lo que este se ha vuelto uno de los materiales de interés en la actualidad para su uso o implementación en distintos procesos. En este proyecto la arcilla que se estudiará será la bentonita, cuya descripción se presenta a continuación.

### **1.8.1 Bentonita**

La bentonita está conformada principalmente por minerales del grupo esmectita, su estructura está compuesta por un apilamiento de tres capas: la primera y la tercera es una capa tetraédrica de óxido de silicio y la segunda es una capa octaédrica de aluminio hidratado, las cuales están unidas covalentemente por una relación 2:1, como se muestra en la Figura 16, en la capa tetraédrica se tiene algunas sustituciones por iones  $Al^{3+}$  de los iones de  $Si^{4+}$  y en la octaédrica los iones de  $Al^{3+}$  pueden presentar sustituciones por iones divalentes de Fe y Mg. Las sustituciones presentadas generan una carga negativa en la estructura que puede ser neutralizada por cationes de calcio, sodio y magnesio. La bentonita tiene una distancia basal ( $d_{001}$ ) entre 10 y 14 Å, esta variación se presenta cuando la arcilla es hidratada [48]. La bentonita puede ser clasificada como cálcica y sódica con base en el ion que predomine entre sus capas, donde se conoce que la primera tiene una mayor capacidad de dilatación en agua debido a que es mayormente porosa, por lo que destaca en investigaciones relacionadas con materiales absorbentes de agua y otras moléculas [47].

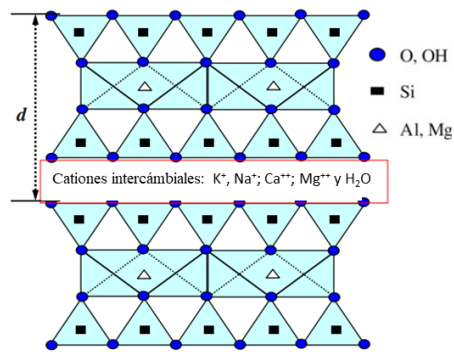


Figura 16. Estructura atómica de la bentonita [48].

La bentonita es una de las arcillas más abundantes en México, principalmente en los estados de Durango, San Luis Potosí y Puebla. Las propiedades de esta arcilla son dependientes de su grado de cristalinidad y tamaño de cristal por lo que sus propiedades pueden cambiar con base en estos parámetros. Gracias a estas variaciones, la bentonita se usa en diversos campos industriales para una infinidad de aplicaciones, ya sea como agente aglutinante, en la fabricación de moldes para fundición, como catalizador, para cementar fisuras y grietas de rocas, como adsorbente de toxinas y en el campo de la construcción es usada comúnmente en ladrillos, azulejos, productos de yeso o como barreras impermeables debido a su alta plasticidad y sus propiedades térmicas [47]. Esta arcilla puede mezclarse con polímeros u otros materiales para generar materiales compuestos, que pueden ser usados en aplicaciones donde se requieran propiedades específicas de la arcilla.

## 1.9 Fibras naturales

En diversos estudios se ha demostrado que el uso de fibras naturales como refuerzo de compuestos de matriz polimérica, aportan muchas ventajas al material y esto es debido a que las fibras cuentan con: una gran disponibilidad de los recursos, un bajo costo, biodegradabilidad, un peso ligero, entre otras propiedades [49]. Una de las características de mayor interés es que presentan propiedades mecánicas adecuadas para su uso en la construcción, además se ha reportado que mejoran las propiedades térmicas y acústicas de un material [49].

### 1.9.1 Fibra de coco

La fibra de coco es un subproducto que se obtiene del desecho del mesocarpio o cáscara del fruto del coco. Existen dos tipos diferentes de fibra de coco, la blanca que es un tipo de fibra suave y delegada cuyo principal uso es en productos tejidos, mientras que la marrón, en

comparación con la blanca, es mucho más gruesa y cuenta con una mayor resistencia a la abrasión. Debido a la alta disponibilidad de palmeras de coco en países con climas tropicales, se han estado investigando las fibras de coco para su uso en diferentes aplicaciones como lo son: fertilizantes, cepillos, telas, recipientes, cuerdas, etc. En la construcción, las fibras de coco se pueden utilizar como materiales de aislamiento y refuerzo de materiales cementosos [50]. En México, la palma de coco se cultiva en Campeche, Chiapas, Colima, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Tabasco y Veracruz. Siendo Guerrero el principal productor, ya que este aporta el 80% de la producción nacional que equivale a 178.2 mil toneladas por año [51].

### **1.9.2 Fibras de nopal**

El nopal es una planta que crece en tierras áridas y semiáridas, la gran ventaja de estos es su alta resistencia a la sequía y su fácil proceso de producción. En México este se produce en el 70% del país, principalmente en Coahuila, Chihuahua, Guanajuato, Guerrero, Oaxaca, San Luis Potosí y Zacatecas [52]. La fibra de nopal se ha utilizado en una serie de aplicaciones debido a sus características de renovabilidad, biodegradabilidad y sostenibilidad potencial, como lo son: tratamientos anticorrosivos para acero, impermeabilizante en morteros y hormigón, refuerzo de materiales cementosos, entre otras [53]. Sin embargo, aún no se tienen reportes de la evaluación acústica de este tipo de fibra. Por esta razón, es necesaria la caracterización las propiedades físicas, químicas y microestructurales para determinar viabilidad y capacidad en la construcción de nuevos materiales biodegradables con buenas propiedades de absorción acústica.

Debido a lo anterior, en este proyecto se evaluaron las propiedades acústicas de compósitos de arcilla reforzados con fibras de coco o nopal, con la finalidad de obtener un material amigable con el ambiente, de bajo costo y con propiedades potencializadas para su uso como aislante y/o absorbente acústico.

# **Capítulo 2: Procedimiento experimental**

## 2.1 Obtención de las fibras naturales

### 2.1.1 Fibras de coco

El proceso de extracción de la fibra de coco se muestra en la Figura 17, primero se seleccionó una muestra madura de coco, posteriormente se procedió a extraer el mesocarpio (cubierta externa del coco) donde se encuentra la mayor parte de las fibras. Este fue seccionado en partes pequeñas, para que las fibras quedaran expuestas y así facilitar el proceso de extracción de forma manual. Una vez que se tenían las fibras, se lavaron para eliminar impurezas y luego se dejaron secar al sol por 24 horas. Finalmente se realizó el proceso de molido en una tritadora hasta obtener fibras homogéneas de tamaño milimétrico [52].

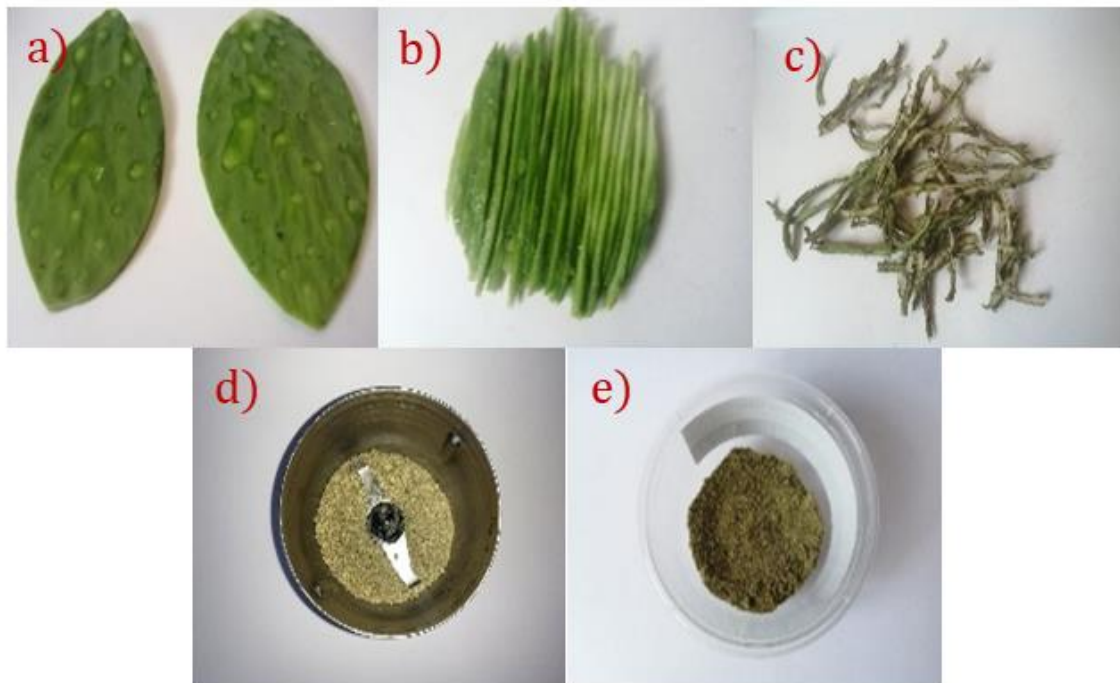


*Figura 17. Diagrama esquemático del proceso de extracción de las fibras de coco a) muestra de coco maduro, b) corte del mesocarpio, c) fibras secas, d) proceso de molido y e) fibras de tamaño homogéneo*

### 2.1.2 Fibras de nopal

Para obtener la fibra de nopal se siguieron los pasos de la figura 18, las muestras de nopal de castilla fueron seccionadas por cortes verticales; estas se sometieron a un proceso de deshidratación en exposición directa bajo el sol durante 7 días. Una vez que las fibras estaban

completamente secas se procedió a triturarlas. Este proceso se realizó varias veces hasta obtener fibras de tamaño milimétrico homogéneo [52].



*Figura 18. Diagrama esquemático del proceso de extracción de las fibras de nopal. a) muestra de nopal de castilla, b) cortes verticales de la muestra, c) fibras secas, d) proceso de molido de la fibra y e) fibras de tamaño homogéneo.*

## **2.2 Síntesis de los compósitos**

La bentonita se adquirió comercialmente, una vez que se obtuvieron las fibras de nopal y coco, se procedió a realizar la síntesis de los compósitos, como se muestra en la figura 19. Primero se pesó la cantidad de fibra y bentonita para realizar los compósitos con base en las fracciones de porcentaje en peso 0-100, 25-75, 50-50, 75-25 y 100-0. Posteriormente se mezclaron junto con 12 ml de agua para obtener una pasta, la cual se colocó en el horno a 90 °C por 1.5 horas [54, 55]. Al finalizar el proceso de secado las pastas se vertieron en un molde cilíndrico, con ayuda de una prensa manual se comprimieron durante 30 minutos y finalmente las muestras se sometieron a un proceso de secado a 30 °C por 2 horas [54].



*Figura 19. Esquema del proceso de síntesis de los composites. a) peso de la cantidad de arcilla y fibra, b) mezcla del compuesto, c) mezcla de la muestra con 12 ml de agua, d) secado a 90 °C por 1.5 horas, e) mezcla moldeable del compuesto, f) preparación de la muestra, g) proceso de prensado, h) secado a 30 °C por 2 horas i) muestras obtenidas.*

### 2.3 Caracterización acústica

La caracterización acústica de los compósitos se realizó en un tubo de impedancias de dos cámaras, las cuales tienen diámetro de 0.12 m y un largo de 8 m y están unidas por un cople donde se coloca la muestra, además que permite darle una continuación al tubo de impedancia. El sistema cuenta con cuatro micrófonos colocados a lo largo del tubo, tres de ellos en la primera cámara acústica y el cuarto micrófono se encuentra posicionado inmediatamente después del material de prueba, como se muestra en la Figura 20 [56]. El registro de la onda incidente y reflejada se realizó con el micrófono 2 y la onda transmitida con el micrófono 4. Los micrófonos 1 y 3 se utilizaron para determinar el factor de atenuación a lo largo del tubo. Dicha caracterización se realizó mediante una interfaz elaborada con el

software de Matlab, la cual utiliza señales sinusoidales moduladas en amplitud para generar la respuesta acústica en frecuencia de los compósitos a través de las ecuaciones 10, 11 y 12; abarcando un rango de frecuencias hasta los 10 kHz. El análisis y procesamiento de las señales cuantificó los coeficientes acústicos de reflexión, transmisión y absorción, en el dominio de la frecuencia [57, 56].

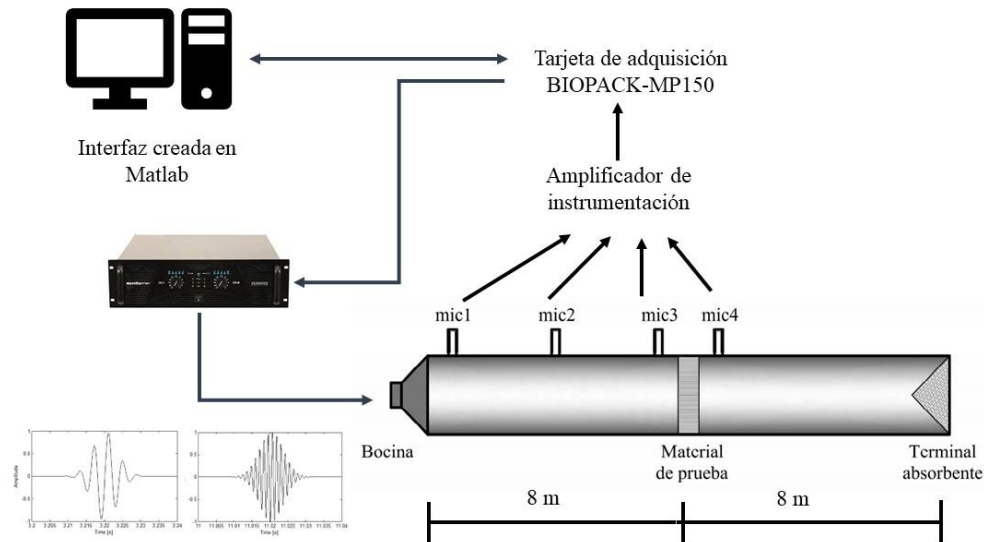


Figura 20. Diagrama esquemático del tubo de impedancias de dos cámaras acústicas

### 2.3.1 Respuesta al impulso

El procesamiento digital de las señales para obtener la respuesta al impulso de un material se ilustra en la Figura 21, que se considera como la huella del material en el dominio del tiempo, consiste en utilizar la información obtenida de los coeficientes acústicos en el dominio de la frecuencia. Basado en las propiedades de la transformada de Fourier se completa la respuesta de amplitud y fase en el dominio de la frecuencia mediante la técnica de añadir ceros (zero padding) hasta completar la mitad de la frecuencia de muestreo, 25 kHz. Posteriormente se toma en cuenta la paridad de la gráfica, función par para la amplitud y función impar para la fase, y con ello se completa la respuesta en frecuencia. Finalmente, la respuesta al impulso se obtiene mediante la transformada inversa de Fourier.

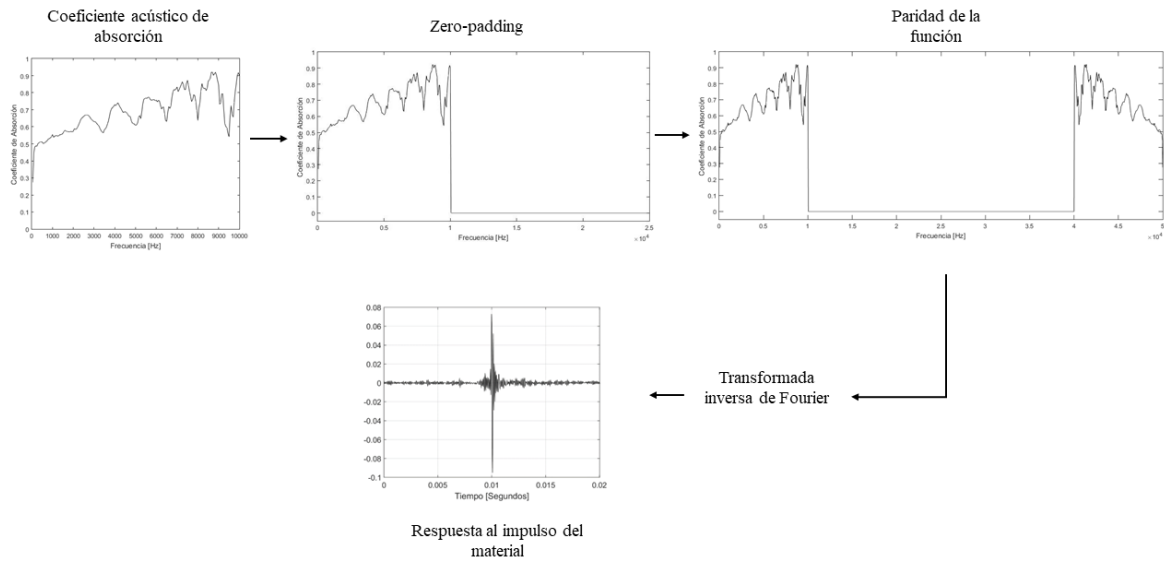


Figura 21. Esquema del proceso para obtener la respuesta al impulso del material.

## 2.4 Variación de la humedad relativa

Se realizó un ensayo donde se evaluaron las propiedades acústicas de los compósitos, simulando el caso de una variación de humedad superficial. Este estudio se llevó a cabo después de 3 meses de realizar la síntesis de los compósitos. Para ello primero se pesaron las muestras secas y se caracterizaron acústicamente, luego se les colocó una gota de agua en la parte superior, se pesaron y se caracterizaron nuevamente. Este proceso se repitió 4 veces con dos muestras para cada composición. Para determinar el porcentaje de humedad relativa se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ humedad} = \frac{W_d - W_E}{W_E} \times 100 \quad (15)$$

Donde  $W_E$  es el peso inicial de la muestra y  $W_d$  es el peso de la muestra después de humedecerla. Finalmente, se analizó la respuesta acústica de los compósitos al ir aumentando la humedad superficial de las muestras.

## 2.5 Caracterización fisicoquímica

Los equipos que se usaron para llevar a cabo la caracterización fisicoquímica se describen a continuación:

### 2.5.1 Difracción de rayos X (DRX)

A través del DRX se determinó la estructura y el porcentaje de los compuestos cristalinos presentes en la arcilla comercial después del proceso de lavado, usando un difractómetro Philips X'PERT PRO (Figura 22), con un monocromador con ánodo de cobre (45 Kv y 40 mA), con una velocidad de barrido de  $0.11^\circ/\text{s}$ , y un intervalo de  $2\theta$  de 5 a  $50^\circ$ .



*Figura 22. Difractómetro Philips X'PERT PRO.*

### 2.5.2 Espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)

Los espectros FT-IR de las muestras de fibra de nopal, fibra de coco y bentonita comercial se obtuvieron con un equipo Spectrum One de la marca Perkin-Elmer (Figura 23) en una configuración de reflectancia total atenuada (ATR).



*Figura 23. Espectrómetro PerkinElmer Spectrum One FT-IR.*

### 2.5.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La morfología estructural y el tamaño de las fibras de coco y nopal se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido usando un microscopio de la marca Zeiss (Figura 24) con un voltaje de 2.0 kV. Esta técnica también se usó para determinar las características de homogeneidad de los compósitos.



*Figura 24. Microscopio electrónico de barrido.*

### 2.5.3 Microscopía óptica

El tamaño de las fibras de coco y nopal en las muestras se analizaron mediante microscopía óptica usando un microscopio digital portátil 1600x (Figura 25).



*Figura 25. Microscopio óptico.*

### 2.5.4 Análisis termogravimétrico (ATG)

La estabilidad térmica de los distintos compósitos se evaluó al finalizar la caracterización acústica mediante la técnica de análisis termogravimétrico en un equipo de la marca TA Instruments modelo SDT Q600, Figura 26. Los termogramas se obtuvieron empleando un

incremento de temperatura de 10 ° C por minuto, en una atmósfera inerte de nitrógeno, hasta alcanzar la descomposición de la muestra.



Figura 26. Equipo ATG / DSC SDT-Q600 de TA Instruments.

## 2.6 Ensayo de dureza Shore

El ensayo de dureza se realizó en las muestras con 3 meses de envejecimiento, con un durómetro ASKER TYPE-D (Figura 27), esta prueba se repitió 10 veces para cada una de las muestras y se usaron 2 muestras diferentes para cada composición.

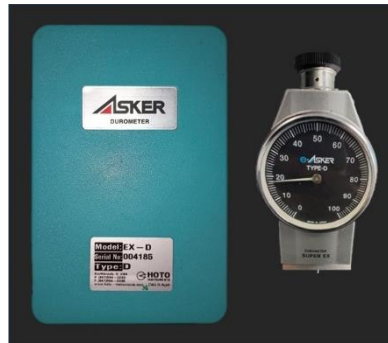


Figura 27. Durómetro ASKER TYPE-D.

## 2.7 Densidad aparente

Para determinar la densidad aparente de los compositos, primero se midió el espesor (h) y el diámetro (d) de la muestra con un vernier para obtener el volumen, dado que la muestra es cilíndrica se ocupó la siguiente fórmula:

$$V = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 h \quad (16)$$

Posteriormente las muestras se pesaron y se cálculo su densidad aparente a través de la siguiente ecuacion:

$$\rho_{aparente} = \frac{\text{masa de la muestra [g]}}{\text{volumen [cm}^3\text{]}} \quad (17)$$

Este parámetro es importante debido a que los materiales para aplicaciones de acondicionamiento acústico son materiales de baja densidad, normalmente se recomienda que los materiales tenga una densidad de entre 40 y 70  $\frac{Kg}{m^3}$  [58].

# **Capítulo 3: Propiedades fisicoquímicas de los precursores**

### 3.1. Análisis estructural de la bentonita

Antes de realizar la síntesis de los compósitos, se analizaron las propiedades fisicoquímicas de la bentonita para determinar la estructura y el porcentaje de los compuestos cristalinos presentes. Este proceso se realizó con bentonita comercial y después fue sometida a un proceso de calcinación a 400 °C con la finalidad de reducir las características de adsorción de humedad en la arcilla y eliminar cualquier material orgánico [55]. Una vez obtenidos los resultados de difracción de la bentonita, estos se compararon con los patrones reportados en la bibliografía [59]. La Figura 28 muestra el difractograma de la bentonita y bentonita calcinada, donde se puede identificar la presencia de montmorillonita debido a la presencia de distintos picos, los cuales se reportan en la Tabla 6, siendo este el mineral principal del que está formada la bentonita, sin embargo, también se encontraron picos asociados con ciertas impurezas como cuarzo y feldespato [59]. Las distancias interlaminares se calcularon a partir de la Ley de Bragg para cada uno de los picos identificados y también se reportan en a Tabla 6.

*Tabla 6. Picos de difracción y distancias interlaminares de los componentes identificados en la bentonita y bentonita calcinada*

componente	bentonita		bentonita calcinada	
	Angulo 2θ (°)	Distancia interlaminar (Å)	Angulo 2θ (°)	Distancia interlaminar (Å)
montmorillonita	7.07	12.50	7.23	12.22
	10.10	8.75	9.97	8.86
	13.95	6.35	13.95	6.34
	15.15	5.85	15.15	5.85
	19.69	4.51	16.69	5.31
	20.01	4.44	20.95	4.24
	21.53	4.19	21.97	4.04
	22.21	4.13	22.61	3.93
	26.97	4.00	23.75	3.74
	29.75	3.30	27.83	3.20
	35.19	3.00	29.75	3.00
	39.83	2.55	35.05	2.56
	48.69	2.26	39.59	2.28
cuarzo	26.91	3.31	48.65	1.87
			19.93	4.45
feldespato	28.33	3.14	26.75	3.33
			28.11	3.17

Los difractogramas de las muestras de fibra de coco y nopal presentaban una estructura amorfa en la cual se logró identificar ningún componente, debido a esto se decidió no anexar las gráficas obtenidas en el presente reporte.

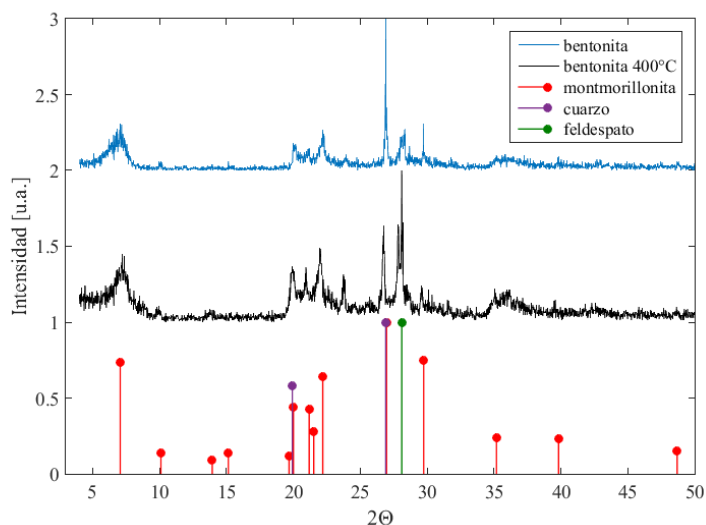


Figura 28. Patrón de difracción de rayos X de la bentonita (línea negra) y bentonita calcinada (línea azul).

A partir del análisis de las intensidades relativas de los picos de difracción se determinaron los porcentajes de los compuestos identificados con y sin tratamiento térmico con las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ componente} = \frac{\sum_1^n I_n}{\sum I_{\text{total}}} \quad (18)$$

$$\sum I_{\text{total}} = \sum_1^n I_{\text{componente 1}} + \sum_1^n I_{\text{componente 2}} + \dots + \sum_1^n I_{\text{componente k}} \quad (19)$$

Donde  $I_n$  representa la intensidad de un pico de difracción para cada componente,  $n$  representa el número de picos identificados e  $I_{\text{total}}$  es igual a suma de todas las intensidades presentes en el difractograma. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7, cabe mencionar que estos datos son similares a los que se presentan en las fichas técnicas de bentonita publicadas por la Subsecretaría de Minería de México [47]. La presencia de montmorillonita representa para la bentonita el mayor porcentaje, incluso después del proceso de calcinación. Este tipo de arcilla laminar disminuye su carácter hidrófobo cuando se calcina [55], lo que permite la incorporación de las fibras o de otras sustancias en los espacios interlaminares; por su parte, la presencia de cuarzo y feldespato aportan dureza al material. Para calcular el tamaño

promedio de los nanocristales en las estructuras se utilizó la ecuación de Scherrer y el pico de mayor intensidad obtenido para cada compuesto. El tamaño de cristal obtenido indica que la bentonita tiene componentes del orden nanométrico y que estos disminuyen ligeramente con la calcinación, lo que se atribuye a la erosión que sufre el material cuando es tratado térmicamente.

*Tabla 7. Tamaño de cristal de los componentes presentes en la bentonita.*

	bentonita		bentonita calcinada	
	Tamaño de cristal (nm)	Porcentaje (%)	Tamaño de cristal (nm)	Porcentaje (%)
montmorillonita	54.45	59.15	40.82	58.30
cuarzo	51.37	25.33	43.08	15.79
feldespato	48.19	7.22	45.49	15.68
fondo	----	8.30	-----	10.24

### 3.2 Análisis de los grupos funcionales

La técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier se usó para determinar los grupos funcionales presentes en los precursores de los compósitos. El análisis FT-IR de la bentonita, Figura 29, presentó bandas en 3626 y 915  $\text{cm}^{-1}$  que son atribuidas a las vibraciones -OH y Si-O respectivamente asociadas con la montmorillonita, además de que la banda presente en 789  $\text{cm}^{-1}$  indica que la montmorillonita es abundante en Mg y Fe [60], la banda débil en 1634  $\text{cm}^{-1}$  se pueden asociar a una baja cantidad de agua presente en la arcilla [61]. Las bandas en 915, 789, 516 y 457  $\text{cm}^{-1}$  se atribuyen al estiramiento de Si-O-Si y Al-O-Si que confirman la presencia de montmorillonita [62].

El FT-IR de la fibra de coco y fibra de nopal se muestra en la Figura 29, donde se identificaron bandas de absorción en 3279 y 3270  $\text{cm}^{-1}$ , las cuales se atribuyen a la vibración de estiramiento -OH asociada a polisacáridos como lignina celulosa y hemicelulosa de la fibra de coco y nopal respectivamente [63]. También se tienen bandas en 2898 y 2905  $\text{cm}^{-1}$ , las cuales están presentes en los polisacáridos con la que se puede confirmar la presencia de la celulosa [64]. Las bandas ubicadas en 1607, 1519, 144  $\text{cm}^{-1}$  para el coco y 1604, 1514 y 147  $\text{cm}^{-1}$  del nopal se atribuyen al estiramiento de C=O con lo que se confirma la presencia de lignina [65]. La banda más significativa ubicada en 1034 y 1039  $\text{cm}^{-1}$  se atribuye a enlaces C-O de alcoholes y se relacionan con la molécula de la hemicelulosa que se encuentra comúnmente en este tipo de fibras [64].

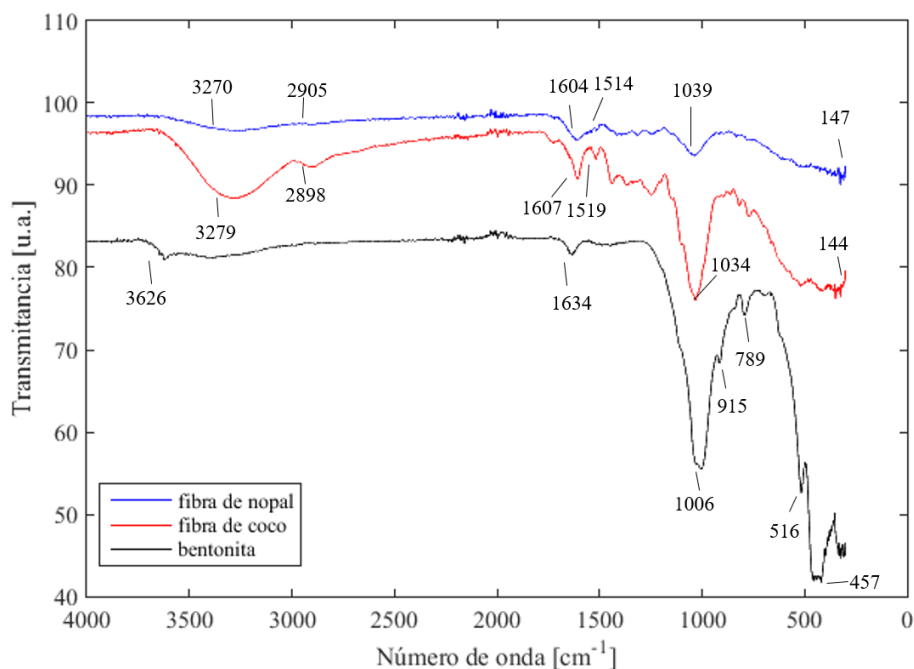
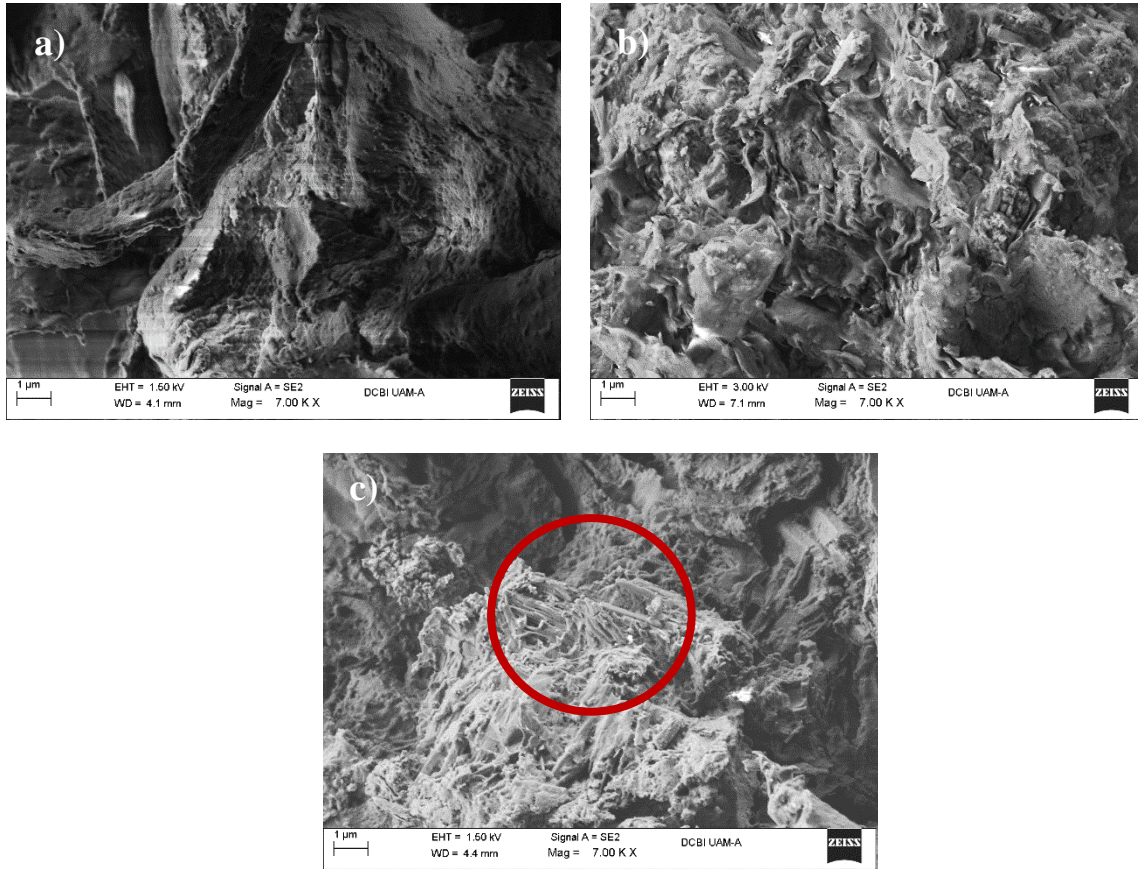


Figura 29. Espectro FT-IR de bentonita (línea negra), fibra de coco (línea roja) y fibra de nopal (línea azul).

Las diferencias principales entre las fibras de coco y nopal están en las bandas intensas a  $3279\text{ cm}^{-1}$  que se atribuyen a los grupos  $\text{-OH}$ , este resultado es debido a la presencia de la lignina y hemicelulosa, como se mencionó anteriormente. Cabe resaltar, que las fibras se aislaron eliminando el mucilago del nopal, sin embargo, este puede estar presente en baja concentración lo que cambia las propiedades de la fibra. El mucilago ocasionaría que las fibras de nopal estén aglomeradas [66] y por lo tanto se podrían mantener juntas cuando se forme el compósito.

### 3.3 Análisis morfológico

En la Figura 30 a se muestran las imágenes MEB de la fibra de coco, donde se observa una superficie porosa e irregular. Las imágenes MEB de la bentonita, Figura 30 b, muestran que se trata de un mineral esméctico en capas o lamelas con cavidades discontinuas. En el caso de la fibra de nopal, Figura 30 c, se tiene una superficie similar a la del coco, sin embargo, se observa en el círculo rojo la presencia de fibras de tamaño nanométrico, las cuales cuentan con diámetros entre los 71.9 y 219.7 nm.



*Figura 30. Micrografías MEB a 7000 aumentos de a) Fibra de coco, b) bentonita y c) fibra de nopal.*

Debido a que en las imágenes MEB de la fibra de coco no se aprecia el diámetro de las fibras, se decidió evaluar las muestras con un microscopio óptico. La Figura 31 presenta las imágenes de la muestra de 100 % coco y un histograma del diámetro de las fibras, el cual se obtuvo con el software imageJ, con el cual se mide el diámetro de cada una de las fibras obtenidas de manera manual, posteriormente los datos son procesados en Origin donde se genera la gráfica de distribución con un ajuste gaussiano. De acuerdo con la distribución obtenida de 207 datos el diámetro promedio de las fibras es de 0.16 mm con una desviación estándar de 0.09 mm.

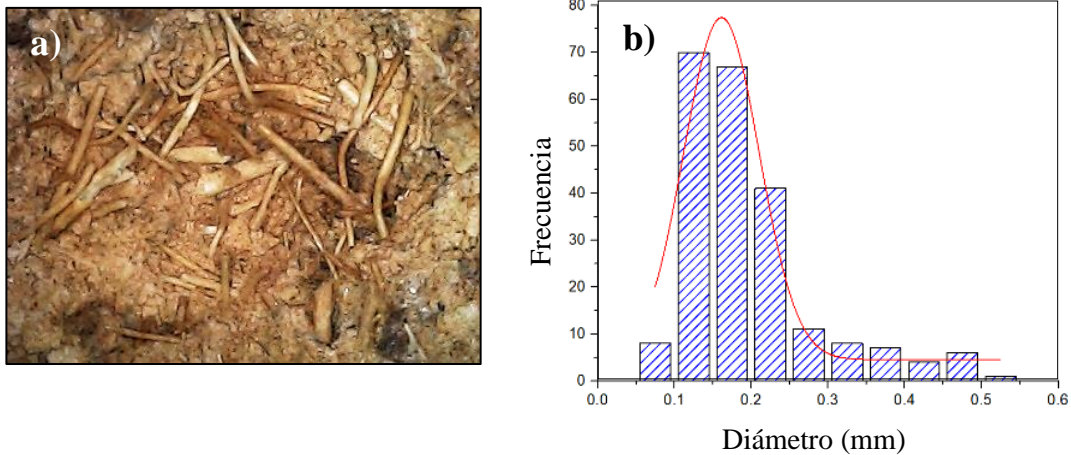


Figura 31. a) Imágenes de microscopio óptico de la fibra de coco y b) gráfica de distribución.

Las imágenes de la fibra de nopal se muestran en la Figura 32, en esta no se pueden identificar las fibras, sin embargo, se puede identificar partes brillantes los cuales están marcados con círculos rojos y que se atribuyen a la presencia de una resina natural principalmente al mucilago del nopal.

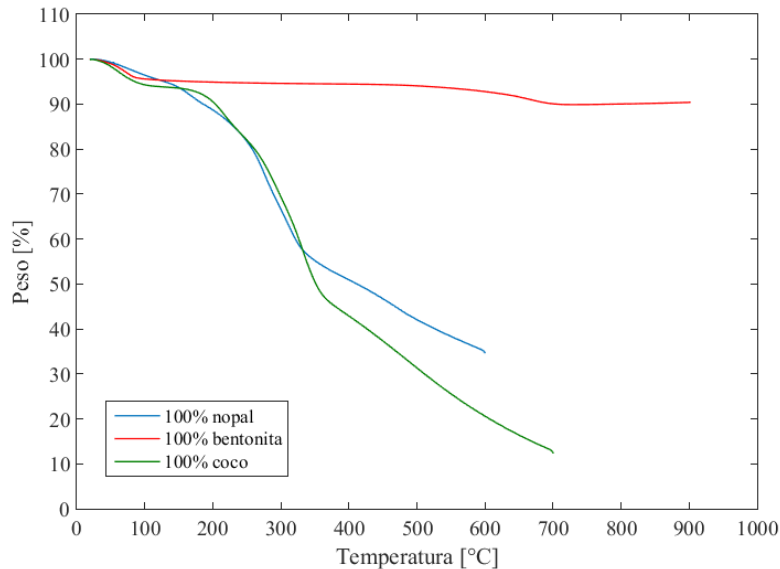


Figura 32. a) Imágenes de microscopio óptico de la fibra de nopal.

### 3.4 Análisis termogravimétrico

El ATG describe la descomposición de una muestra asociada directamente a un tratamiento térmico. La Figura 33 muestra el ATG para la bentonita, la fibra de coco y la fibra de nopal. Como se observa en la gráfica, la bentonita es el material más estable debido a que solo tiene dos pérdidas de peso mínimas. La primera, entre 20 y 120 °C, se asocia con la pérdida de agua y la segunda pérdida, entre 650 y 800 °C, está relacionada con la endoterma característica de la montmorillonita, las cuales corresponde al 5 y 4 % de peso respectivamente [67, 68]. La degradación térmica de ambas fibras ocurre en tres pasos, el primero debido a la eliminación de humedad en el material ocurre entre los 20 y 120 °C, con

una pérdida de peso de 6.7% para el coco y 4.8% para el nopal. El segundo ocurre en un rango de temperatura entre 150 °C y 350 °C con una máxima pérdida de peso del 43.5% para la fibra de coco y 38.1% para la fibra nopal debida a la eliminación de lignina, celulosa y hemicelulosa. Finalmente, la última pérdida que ocurre a partir de los 350 °C es de 42.3% para el coco y 28.6% para el nopal respectivamente [69, 70, 71]. A través de los resultados obtenidos se tiene que el material con mejor estabilidad térmica es la bentonita, seguida de las fibras donde la muestra de fibra de nopal es más estable térmicamente que la del coco, la diferencia obtenida entre la estabilidad de las fibras se puede atribuir a la presencia de hemicelulosa que se observó en el FTIR y en las imágenes ópticas del nopal, ya que está comprobado que los tejidos celulósicos se incineran con mayor lentitud que las fibras naturales [72].



*Figura 33. Análisis termogravimétrico de la bentonita (línea roja), la fibra de nopal (línea azul) y fibra de coco (línea verde).*

# **Capítulo 4.**

## **Propiedades fisicoquímicas de los compósitos**

## 4.1 Propiedades mecánicas

A través del proceso de síntesis se obtuvieron distintas muestras de cada composición, de las cuales se seleccionaron 3 que contaban con un espesor y peso similar. Los compósitos obtenidos se muestran en la Figura 34.



Figura 34. Compósitos de a) fibra de coco y b) fibra de nopal.

### 4.1.1 Densidad aparente

La densidad aparente de los materiales se obtuvo al dividir la masa de las muestras por unidad de volumen. Como se observa en la Tabla 8 el material más denso es la muestra de 100% bentonita y el de menor densidad es la fibra de coco. Después de medir los valores de las muestras de referencia, se obtuvo un modelo (regla de mezclas) [73] que permite predecir la densidad de los compósitos a través de la siguiente ecuación:

$$\rho = (\% fibra \times \rho_{fibra}) + (\% bentonita \times \rho_{bentonita}) \quad (20)$$

La densidad de la bentonita y de las fibras se determinó experimentalmente, con los materiales preparados con el 100 % de los precursores. En comparación con el modelo teórico, la densidad medida para cada material presenta un valor cercano al que se obtuvo en el modelo, con un error promedio de  $\pm 0.15 \text{ g/m}^3$  para los compósitos de coco y  $\pm 0.19 \text{ g/m}^3$  para los de nopal, donde los últimos presentan valores de densidad más alto, además que entre mayor es el porcentaje de fibra en el material se tiene una menor densidad. Este resultado es de esperarse ya que las fibras generan defectos en el material y la densidad del material estará en función de la incorporación de las fibras en cada compósito. Es decir, al

agregar un material más ligero a la bentonita la densidad disminuye de forma proporcional a la cantidad agregada de material ligero.

Tabla 8. Propiedades de densidad de las muestras.

Composición		Densidad (g/m <sup>3</sup> )		
nopal (%)	bentonita (%)	Teórica	Experimental	Diferencia
100	0	0.90	0.90 ± 0.01	0
75	25	1.06	0.89 ± 0.02	17
50	50	1.22	1.01 ± 0.02	21
25	75	1.38	1.18 ± 0.04	20
0	100	1.53	1.53 ± 0.03	0

Composición		Densidad (kg/m <sup>3</sup> )		
coco (%)	bentonita (%)	Teórica	Experimental	Diferencia
100	0	0.39	0.39 ± 0.02	0
75	25	0.68	0.44 ± 0.02	24
50	50	0.96	0.82 ± 0.01	14
25	75	1.25	1.18 ± 0.04	7
0	100	1.53	1.53 ± 0.03	0

#### 4.1.2 Dureza

La dureza de los compósitos se determinó con un durómetro en diez puntos diferentes de cada uno de los materiales. La Figura 35 ilustra el equipo usado para medir la dureza en una muestra, posteriormente se realiza el promedio de los datos obtenidos y se calcula la desviación estándar.



Figura 35. Registro de las medidas de dureza de la muestra compósito de 100% fibra de coco.

Con los resultados de dureza de los materiales de referencia (bentonita, fibra de coco y nopal) se usó nuevamente el modelo de la regla de las mezclas para predecir la dureza de los compósitos, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$\text{dureza} = (\% \text{ fibra} \times \text{dureza}_{\text{fibra}}) + (\% \text{ bentonita} \times \text{dureza}_{\text{bentonita}}) \quad (21)$$

Tabla 9. Propiedades de dureza de las muestras

Composición		Dureza (u.a.)		
nopal (%)	bentonita (%)	Teórica	Experimental	Diferencia
100	0	25.65	25.65 ± 0.40	0.00
75	25	26.68	25.83 ± 0.60	0.85
50	50	27.70	26.28 ± 0.70	1.42
25	75	28.73	27.30 ± 0.60	1.43
0	100	29.75	29.75 ± 0.70	0.00

Composición		Dureza (u.a.)		
coco (%)	bentonita (%)	Teórica	Experimental	Diferencia
100	0	19.30	19.30 ± 0.40	0.00
75	25	21.91	20.60 ± 0.70	1.31
50	50	24.53	26.05 ± 0.60	1.52
25	75	27.14	29.15 ± 0.80	2.00
0	100	29.75	29.75 ± 0.70	0.00

En la tabla 9 se reportaron los datos obtenidos, en comparación con los datos calculados con la ecuación 14, la dureza de los compósitos de 75% fibra presentaron un valor cercano al que se esperaba teóricamente, sin embargo, al ir aumentando el porcentaje de bentonita en las muestras, la diferencia en las medidas de la dureza se incrementó. La muestra de 100 % bentonita es el material más duro, mientras que el de menor dureza es el de 100 % fibra de coco. Por lo que a mayor porcentaje de bentonita se incrementa la dureza, siendo el compósito de 75 % bentonita y 25 % coco el material con una dureza similar a la muestra de 100 % bentonita. Cabe mencionar que, para el caso de los compósitos de fibra de nopal, el aumento de la dureza al agregar la bentonita es mínimo, por lo que no se logra apreciar una diferencia en la Tabla 9. La diferencia de las durezas experimental y teórica se pueden atribuir a los defectos formados en la estructura, ya que las fibras pueden adherirse homogéneamente y con la misma fuerza. Sin embargo, debido a la presencia de la lignina y hemicelulosa que varía para cada fibra, la adherencia y por lo tanto la formación de defectos no se considera similar para cada material, lo que modifica sus propiedades, adicionalmente cabe señalar que el modelo utilizado considera el uso de fibras unidireccionales, lo que significa que estos compósitos no tienen un arreglo periódico.

## 4.2 Análisis morfológico

Del análisis de las micrografías ópticas de los compósitos, Figura 36, en las muestras de coco se logra apreciar como las fibras se dispersaron aleatoriamente en la bentonita, además que se reduce la cantidad de fibras con respecto a la composición de la muestra. Para el caso de los compósitos de nopal, se distingue una dispersión del nopal gracias al color verde oscuro de las fibras y al aumentar la cantidad bentonita en la muestra, el compósito se torna más claro.

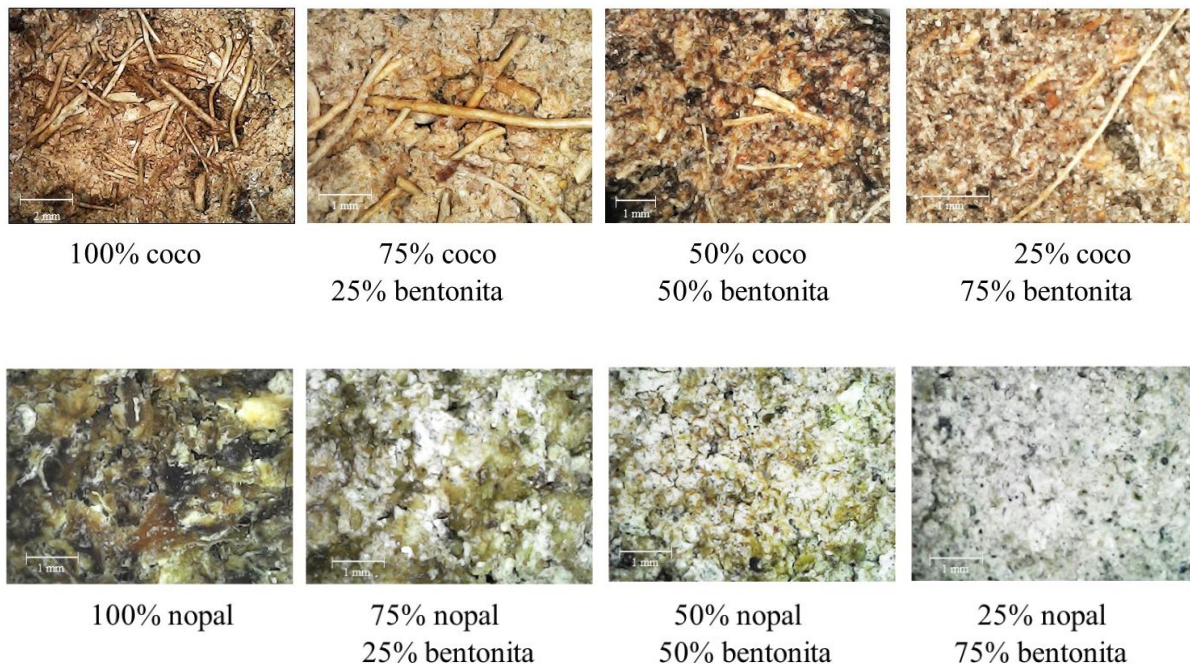


Figura 36. Micrografías ópticas de a) fibra de coco y b) fibra de nopal.

## 4.3 Análisis termogravimétrico

### 4.3.1 Compósitos de coco

La Figura 37 muestra el ATG para la bentonita, la fibra de coco y el compósito de 75% fibra de coco y 25% bentonita. El ATG de la fibra de coco tiene la primera pérdida correspondiente a la vaporización del agua entre los 20 y 100 °C, eliminando 6.7% del peso, la segunda pérdida de peso del 8.1% se encuentra alrededor de los 217 °C, la cual es atribuida a la eliminación de celulosa y la tercera pérdida del 35% de masa está ubicada entre los 270 y los 400 °C y es atribuida a la eliminación de hemicelulosa y lignina [69, 70, 71]. La bentonita muestra una primera pérdida de peso del 5% debida a la humedad adsorbida a la temperatura de 72 °C. La segunda pérdida que corresponde al 4 % del peso, después de los 600 °C, es

debida a la endoterma, esta es debida a la endoterma característica de la montmorillonita que aparece alrededor de los 700 °C [67, 68]. El compósito presenta pérdidas similares a las del coco, ya que la primera correspondiente a la eliminación del 5% de agua se encuentra entre los 20 y 100 °C. La pérdida de 6.1% en peso alrededor de los 207°C se relaciona con la eliminación de celulosa, mientras que la pérdida ubicada entre los 250 y los 380°C, corresponde a eliminación de la lignina y hemoceles que aporta la fibra de coco, con una reducción del 27% porcentaje en peso [67, 68, 69]. Sin embargo, el compósito presenta una menor pérdida de peso desde 100 ° C y se observa mayormente a 700 ° C. Este resultado se atribuye a la estabilidad de la bentonita, que a pesar del alto contenido de la fibra existe una interacción entre los precursores que genera dicho efecto. Este resultado indica que el material compósito con 75 % de coco y 25 % de bentonita es más resistente térmicamente, lo que le da un potencial para aplicaciones que requieran variaciones de temperatura.

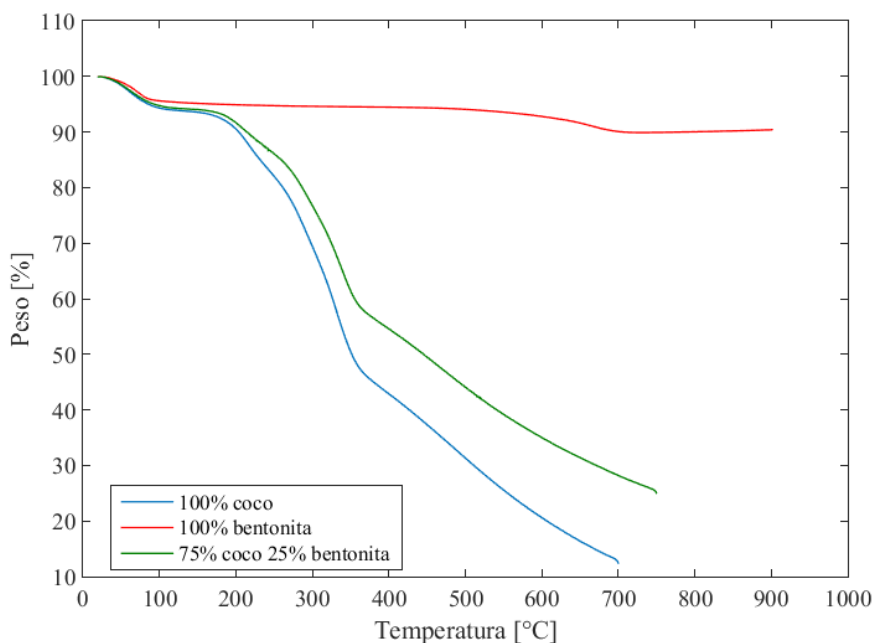
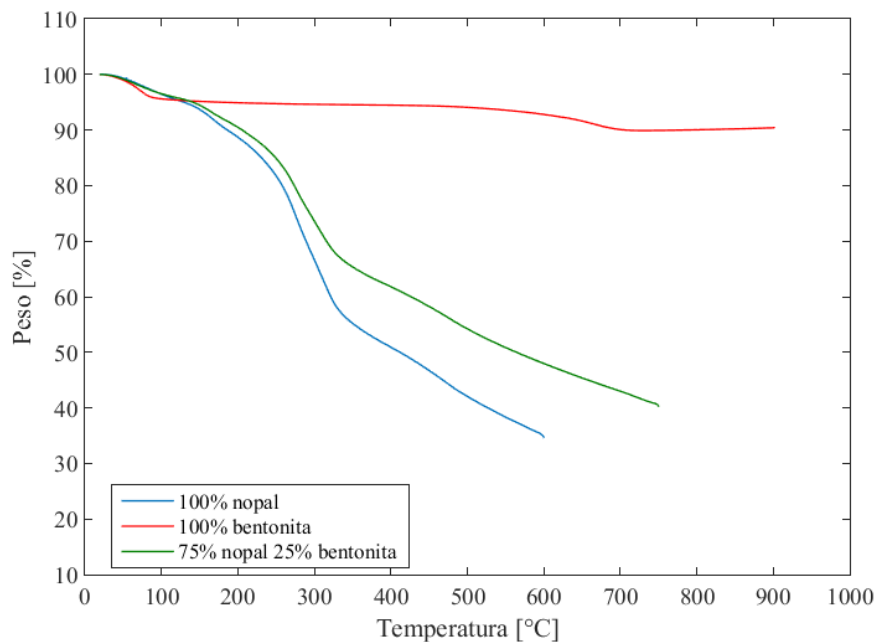


Figura 37. Análisis termogravimétrico de la bentonita (línea roja), la fibra de coco (línea azul) y el compósito de 75% fibra de coco y 25% bentonita (línea verde).

#### 4.3.2 Compósitos de nopal

La Figura 38 describe el TGA de la bentonita, la fibra de nopal y el compósito de 75% fibra de nopal y 25% bentonita. En la fibra de nopal la pérdida de peso que se encuentra antes de los 100°C es del 4.3% y es debida a la humedad presente en la fibra. La segunda pérdida de peso entre los 200 y 400 °C que corresponde al 45% está relacionada con la hemicelulosa y

lignina de la fibra [67, 68, 69]. Mientras que el compuesto de 75% nopal presentó una pérdida de peso que se encuentra alrededor de los 70 °C es del 4.4 % y es debida a la cantidad de agua presente en el material. Entre los 120 y 180 °C se tiene una segunda pérdida de peso atribuida a la eliminación de un 4% de celulosa, la tercera pérdida se encuentra entre los 200 y 400 °C y es del 45% relacionada con la hemicelulosa y lignina de la fibra, la cuarta y quinta pérdida de peso que se encuentra alrededor de los 480 y 720°C corresponden a una eliminación de residuos de la fibra del 5% y 2% respectivamente [67, 68, 69].



*Figura 38. Análisis termogravimétrico de la bentonita (línea roja), la fibra de nopal (línea azul) y el compuesto de 75% fibra de nopal y 25% bentonita (línea verde).*

De los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico, se determinó que el material con mejores propiedades térmicas es la bentonita, seguida de las fibras de nopal y por último la fibra de coco. El uso de la bentonita generó un cambio en las propiedades de los compósitos, ya que realizar el compuesto de 75 % fibra y 25% bentonita el material presentó una mayor estabilidad térmica con respecto a las muestras de 100% fibra. Cabe resaltar que la fibra y el compuesto de nopal tiene una mayor estabilidad que la bentonita para temperatura menores a los 100 °C.

# **Capítulo 5.**

# **Propiedades**

# **acústicas**

Los coeficientes acústicos que se presentan a continuación fueron obtenidos del promedio de la caracterización acústica de 3 materiales con la misma composición. El tubo de impedancia con dos cámaras acústicas y el análisis de resultados implementado obtiene los coeficientes de reflexión, transmisión y absorción, a lo largo de un rango de frecuencias de los 50 Hz a 10 kHz, con un tamaño de paso cada 50 Hz. En el Anexo A se reporta el estudio de la reproducibilidad y repetibilidad de las mediciones.

### **5.1 Compósitos de coco**

En la Figura 39a se muestra el coeficiente acústico de reflexión de tres compósitos de coco y bentonita, así como las muestras de coco y bentonita al 100%, las cuales se utilizaron como referencias para comparar el efecto de coeficiente de reflexión en las diferentes composiciones. La muestra de 100% bentonita presenta la mayor amplitud de reflexión de sonido, con un coeficiente superior a 0.6, por arriba de los 1000 Hz. El estudio cuantifica a la muestra de referencia de 100% fibra de coco con un coeficiente de reflexión de 0.7 por debajo de los 1000 Hz, aunque el coeficiente decae a partir de los 1000 Hz. Para el caso de las muestras de referencia se observa, a partir de los 1000 Hz, que el coeficiente de reflexión para la muestra de 100% coco es menor respecto al de 100% bentonita. Para el caso de los compósitos por debajo de los 3800 Hz, aproximadamente se obtuvo que el coeficiente de reflexión se incrementa al disminuir el porcentaje de bentonita, manteniéndose el compósito de 75% coco y 25% bentonita por encima de los otros dos compósitos. En el rango de frecuencia de los 3800 Hz a los 6000 Hz los coeficientes de reflexión de los compósitos se encuentran entre los límites de coeficientes de reflexión de las muestras de referencia, además de que el coeficiente de reflexión disminuye su magnitud, para todas las muestras, en función de la frecuencia.

La Figura 39b presenta los coeficientes acústicos de absorción de los compósitos y las muestras de referencia, donde se observa que la muestra de 100% fibra de coco tiene el mayor coeficiente de absorción y la muestra de 100% bentonita el menor coeficiente. Aunque para frecuencias por debajo de los 500 Hz se tiene el comportamiento opuesto. Cabe mencionar que los coeficientes de absorción de los compósitos, por arriba de los 1000 Hz se encuentran entre los límites de las muestras de referencia, además de que se observa que el coeficiente de absorción se incrementa conforme se reduce el porcentaje de la bentonita.

El coeficiente acústico de transmisión se muestra en la Figura 39c, donde se aprecia que las muestras de referencia de 100% fibra de coco deja pasar la menor cantidad de sonido, como consecuencia a sus propiedades de reflexión y absorción. Destaca que el compósito formado por 25% coco y 75% bentonita es la muestra que deja pasar más sonido, conforme se agrega más fibra de coco este coeficiente disminuye. La muestra de 100% bentonita se encuentra intermedia al comportamiento del resto de las muestras.

En las gráficas puede observarse que el refuerzo de fibra de coco tiene un impacto importante en el coeficiente de absorción con respecto a la muestra de 100 % bentonita, ya que al ir aumentando el porcentaje de fibras de coco en el material la amplitud del coeficiente de absorción también incrementó. Esto se atribuye a que la distribución de las fibras puede causar una estructura porosa y, por lo tanto, las ondas sonoras son mayormente absorbidas por el material. En cuanto a las propiedades de reflexión y transmisión, solo se observa una mejora en las propiedades del compósito que tenía un mayor porcentaje de fibras. De estos resultados se establece que el compósito con mejores propiedades acústicas sería el de 75% fibra de coco y 25 % bentonita, ya que presenta los mayores coeficientes de reflexión y absorción, así como el menor coeficiente de transmisión.

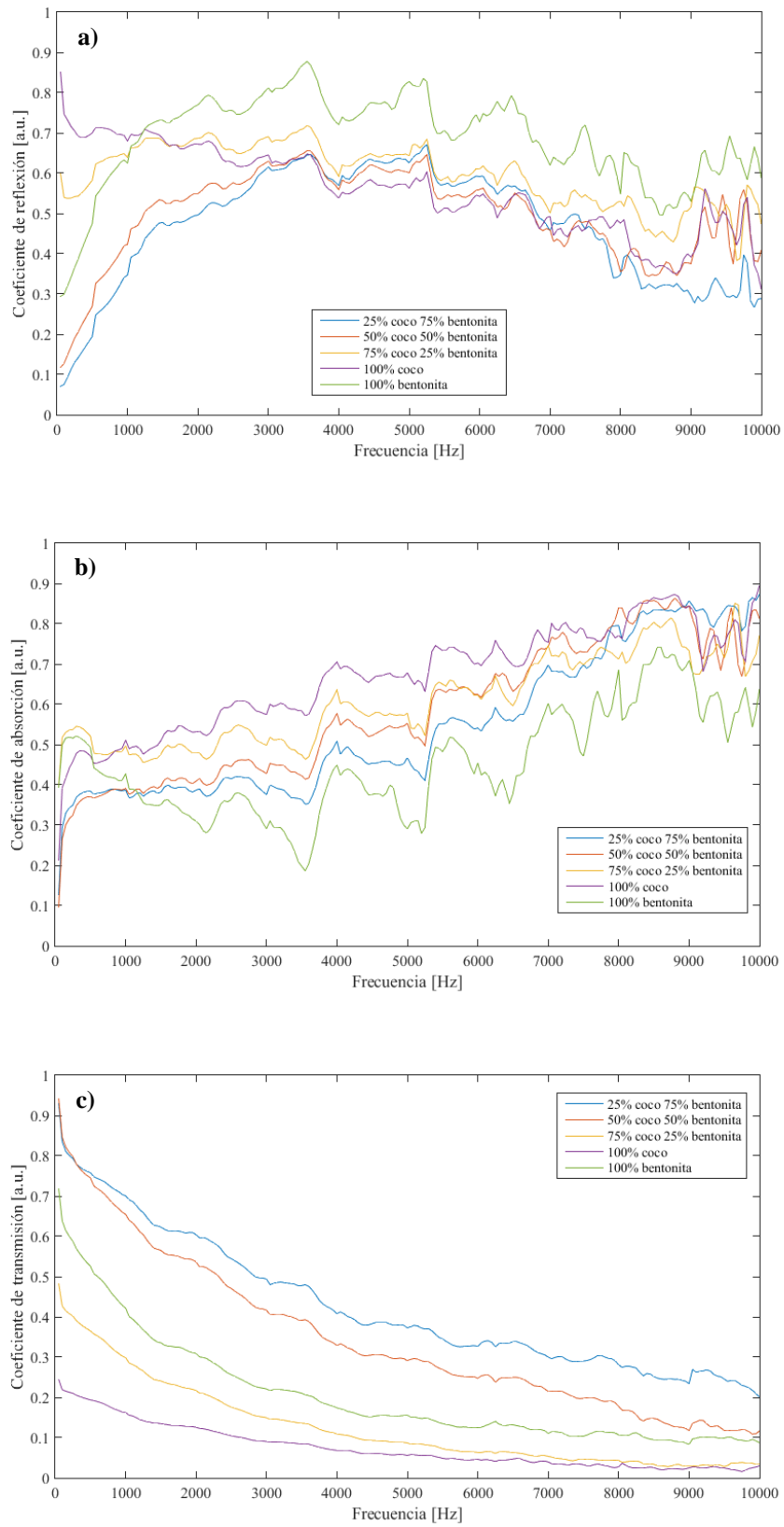


Figura 39. Coeficientes acústicos de los compósitos de coco a) reflexión, b) absorción y c) transmisión.

## 5.2 Compósitos de nopal

La Figura 40a muestra el coeficiente de reflexión de los compósitos elaborados con las fibras de nopal y bentonita. La figura presenta, como referencia, los coeficientes de las muestras de 100% bentonita y 100% fibra de nopal, las cuales a su vez tienen la mayor y menor amplitud de reflexión, respectivamente. En cuanto a los compósitos se observa, por debajo de los 5000 Hz, que conforme se incrementa el porcentaje de fibra de nopal se tiene un mayor coeficiente de reflexión, posteriormente este coeficiente presenta un decaimiento en su magnitud.

La Figura 40b muestra los resultados de absorción de los compósitos de nopal y las de referencia, donde se observa que la muestra que más cantidad de sonido absorbe, por arriba de los 1000 Hz, es la muestra de 100% fibra de nopal. El coeficiente de absorción por debajo de los 2000 Hz presenta una ligera diferencia entre los compósitos, siendo que al incrementar el porcentaje de fibra de nopal aumenta el coeficiente de absorción. Por encima de esta frecuencia no se tiene una diferencia significativa de amplitudes entre los compósitos y la muestra de 100% bentonita, aunque el coeficiente de absorción aumenta en función de la frecuencia.

Por lo que respecta a los coeficientes de transmisión, Figura 40c, se tiene que el menor coeficiente de transmisión en la muestra de 100% bentonita. Los resultados denotan que al incrementar el porcentaje de la fibra de nopal el coeficiente de transmisión se reduce en función de la frecuencia, siendo el compósito de 25% nopal con 75% bentonita el que más deja pasar el sonido. A partir de estos resultados, se observa que el compósito de 75% nopal es el que cuenta con los mayores coeficientes acústicos de transmisión y reflexión con respecto a la fibra de nopal y de absorción con respecto a la bentonita.

En los resultados obtenidos de la caracterización acústica de los compósitos de nopal con bentonita se tiene una mejora en los coeficientes acústicos con respecto a los materiales de referencia, aunque para este caso el aumento se presenta mayormente en las propiedades de reflexión acústica. Este efecto se atribuye a que las fibras de nopal no fueron tratadas, por lo que contienen lignina, lo que funciona como aglutinante generando un material más compacto y menos poroso.

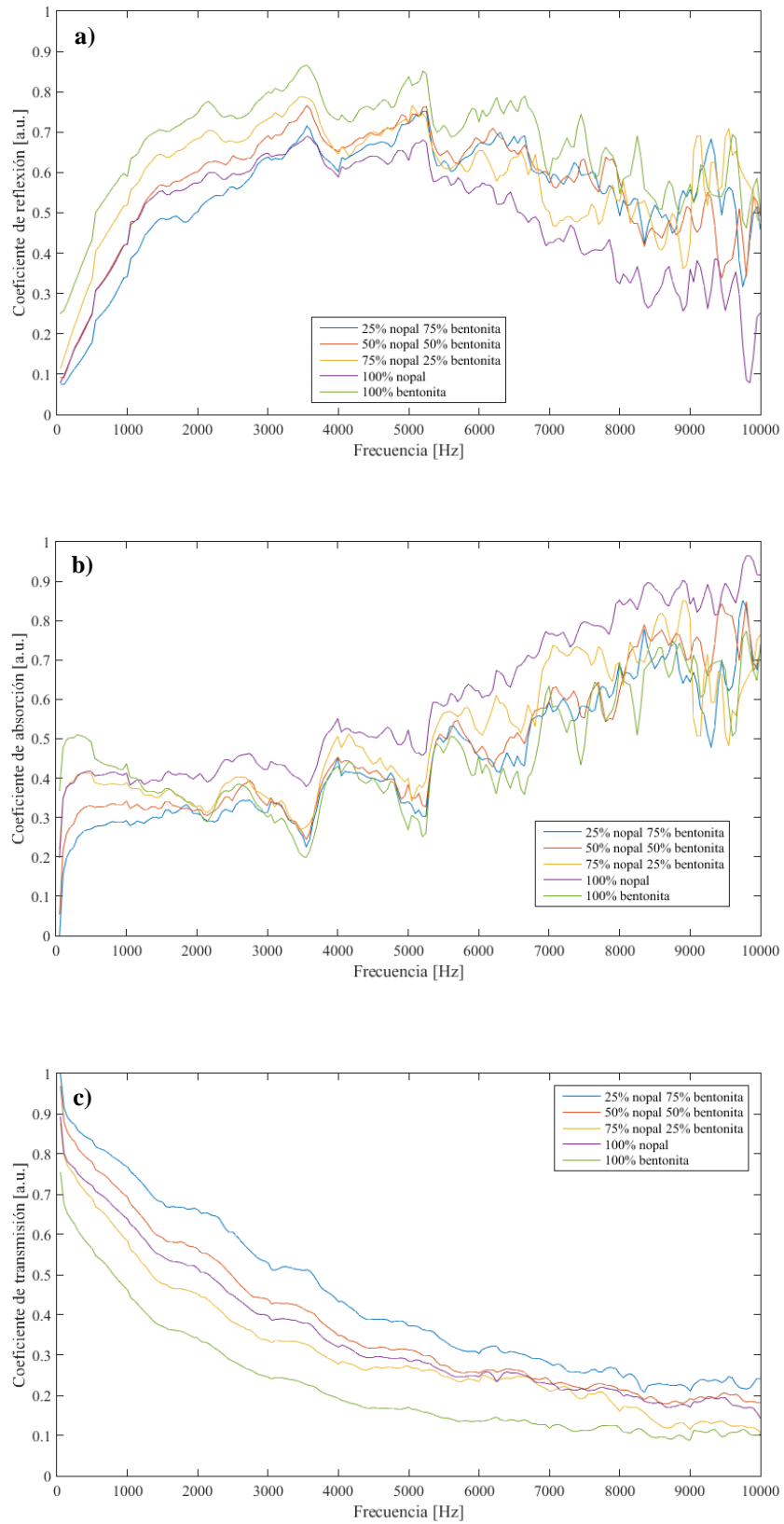


Figura 40. Coeficientes acústicos de los compósitos de nopal a) reflexión, b) absorción y c) transmisión.

### **5.3 Comparación entre los compósitos con mejores propiedades acústicas**

Al realizar la comparación entre todos los materiales estudiados se tiene que el material con mejores propiedades de absorción y reducción de la transmisión de sonido es la muestra de 100% coco y el que presenta mejores propiedades de reflexión acústica es la muestra de 100% bentonita. De los resultados de los compósitos elaborados de nopal o coco con bentonita se observa que los materiales con mayor concentración de fibra, 75% fibra de coco o nopal, presentan propiedades acústicas entre los materiales de referencia.

En la Figura 41a se tiene la comparación del coeficiente de reflexión de los dos compósitos con mayor porcentaje de fibra y menor porcentaje de bentonita. Para frecuencias por debajo de los 2000 Hz es evidente una diferencia de amplitudes de coeficientes, siendo el compósito de nopal menor respecto al compósito de coco. Para frecuencias por arriba de los 2000 Hz no se presenta una diferencia significativa entre los coeficientes, aunque el compósito de nopal es ligeramente mayor. Por lo que si se desean contrarrestar sonidos que se encuentran por debajo de los 2000 Hz, la fibra de coco será una mejor opción.

La comparación del coeficiente de absorción de los compósitos con mayor porcentaje de fibra y 25% bentonita, Figura 41b, muestra que el compósito de la 75% fibra de coco es mejor absorbente que el de 75% fibra de nopal, aunque esta diferencia de amplitudes se reduce para frecuencias por arriba de los 7000 Hz.

La Figura 41c muestra los coeficientes de transmisión de los compósitos, donde el compósito reforzado con 75% fibras de coco deja pasar una cantidad menor de sonido que el de 75% fibra de nopal. La diferencia de amplitudes es significativa, aunque ambos coeficientes reducen su amplitud en función de la frecuencia.

Con base en los resultados presentados se establece que los compósitos reforzados con la fibra de coco tienen una aplicación como un material para acondicionamiento, principalmente porque presenta el mayor coeficiente de absorción de sonido, mientras que ambos compósitos de fibra tienen una aplicación de aislamiento por presentar un alto coeficiente de reflexión.

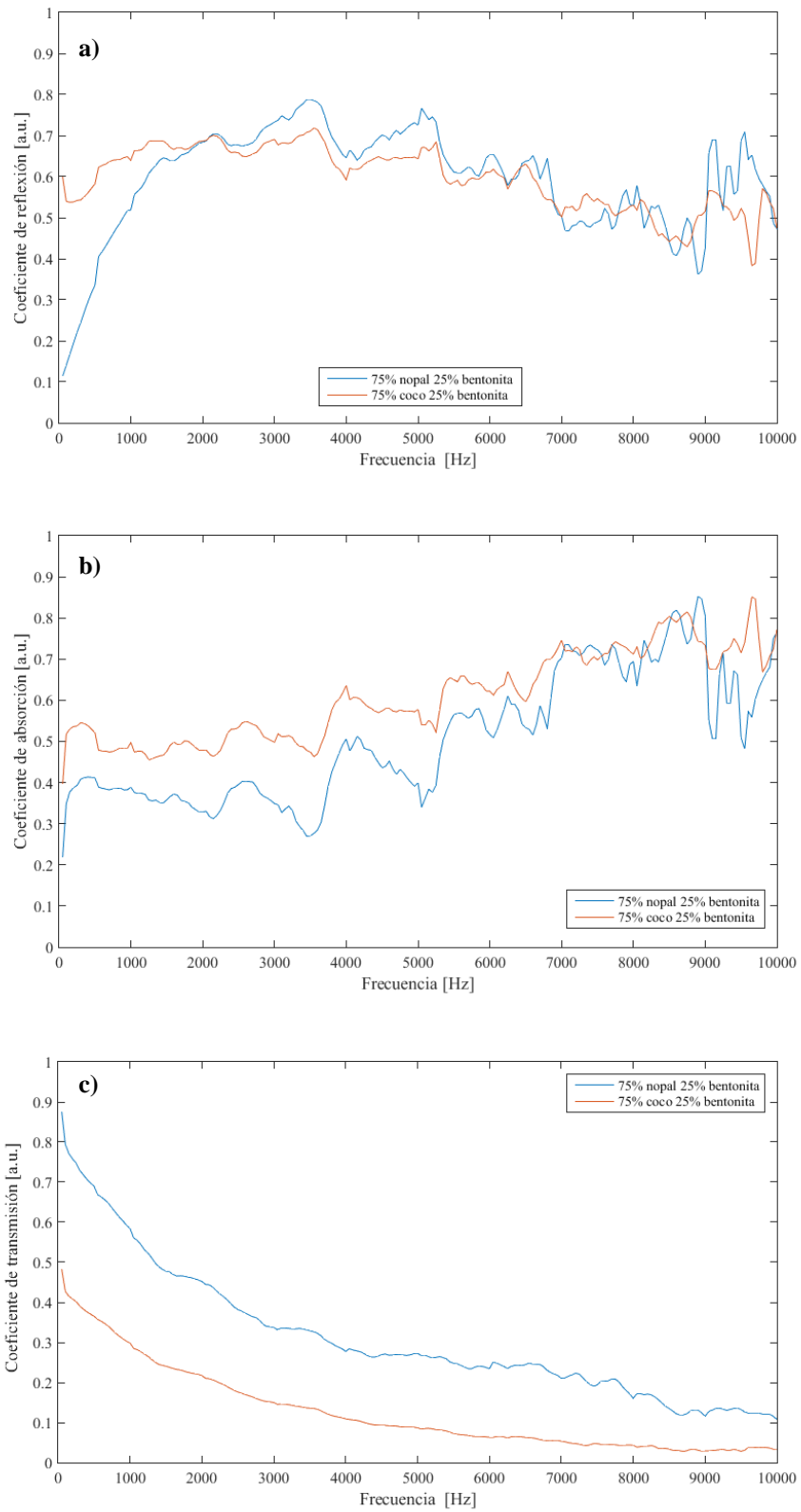
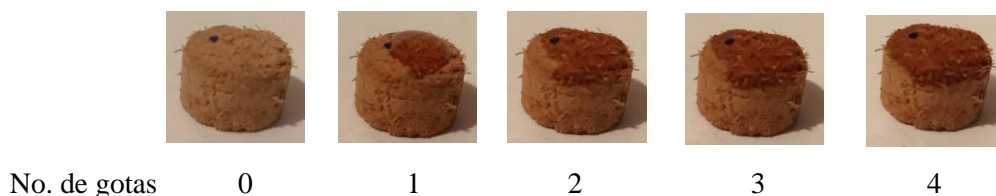


Figura 41. Coeficientes acústicos de los compósitos de 75% fibra de coco y nopal a) reflexión, b) absorción y c) transmisión.

#### 5.4. Análisis de humedad

Con el propósito de analizar el efecto de humedad superficial de las muestras estudiadas, se llevó a cabo un proceso de humidificación sobre una de las caras las muestras. El análisis de humedad se realizó a los nueve materiales estudiados. La Figura 42 muestra el proceso de humidificación de la muestra de 100% fibra de coco. En la imagen se ilustra como al ir aumentando el número de gotas de agua en la superficie el material comienza a absorber el agua. Durante este proceso el peso de la muestra fue registrado con respecto al número de gotas, ver Anexo B.



*Figura 42. Humedad superficial de la muestra de 100% fibra de coco.*

En cada uno de los resultados obtenidos se tomó como referencia la muestra seca (cero gotas) para discernir el efecto de humedad superficial en cada uno de los coeficientes acústicos. Por lo que respecta a la muestra de 100% bentonita, Figura 43, se observa una ligera diferencia, por debajo de los 2000 Hz en el coeficiente de reflexión, entre la muestra seca y las primeras tres gotas. Aunque se tiene una diferencia más significativa para la muestra cuando la cantidad de agua ha alcanzado cuatro gotas. Esta diferencia se observa también en el coeficiente de absorción, siendo menor cuando más humedad se tiene sobre la superficie. Por lo que respecta al coeficiente de transmisión disminuye conforme se incrementa la humedad superficial. La Figura 44 muestra el resultado de los coeficientes acústicos para la muestra de 100% fibra de coco, donde se observa una diferencia más clara al incrementar la humedad superficial. En este caso el coeficiente de reflexión se incrementa al añadir agua, mientras que el coeficiente de absorción y transmisión se reducen conforme se incrementa la humedad superficial. Cabe mencionar que se tiene un coeficiente de transmisión cercano a cero, a partir de los 5000 Hz, cuando se tiene la mayor humedad. La muestra de 100% fibra de nopal presenta cambios muy ligeros en sus coeficientes acústicos, Figura 45. Esto se atribuye al mucilago presente en el nopal, ya que se ha reportado que este puede aportar propiedades hidrofílicas al material, por lo que el agua no puede ser absorbida y con esto se conservan las propiedades acústicas de las fibras de nopal [66, 74].

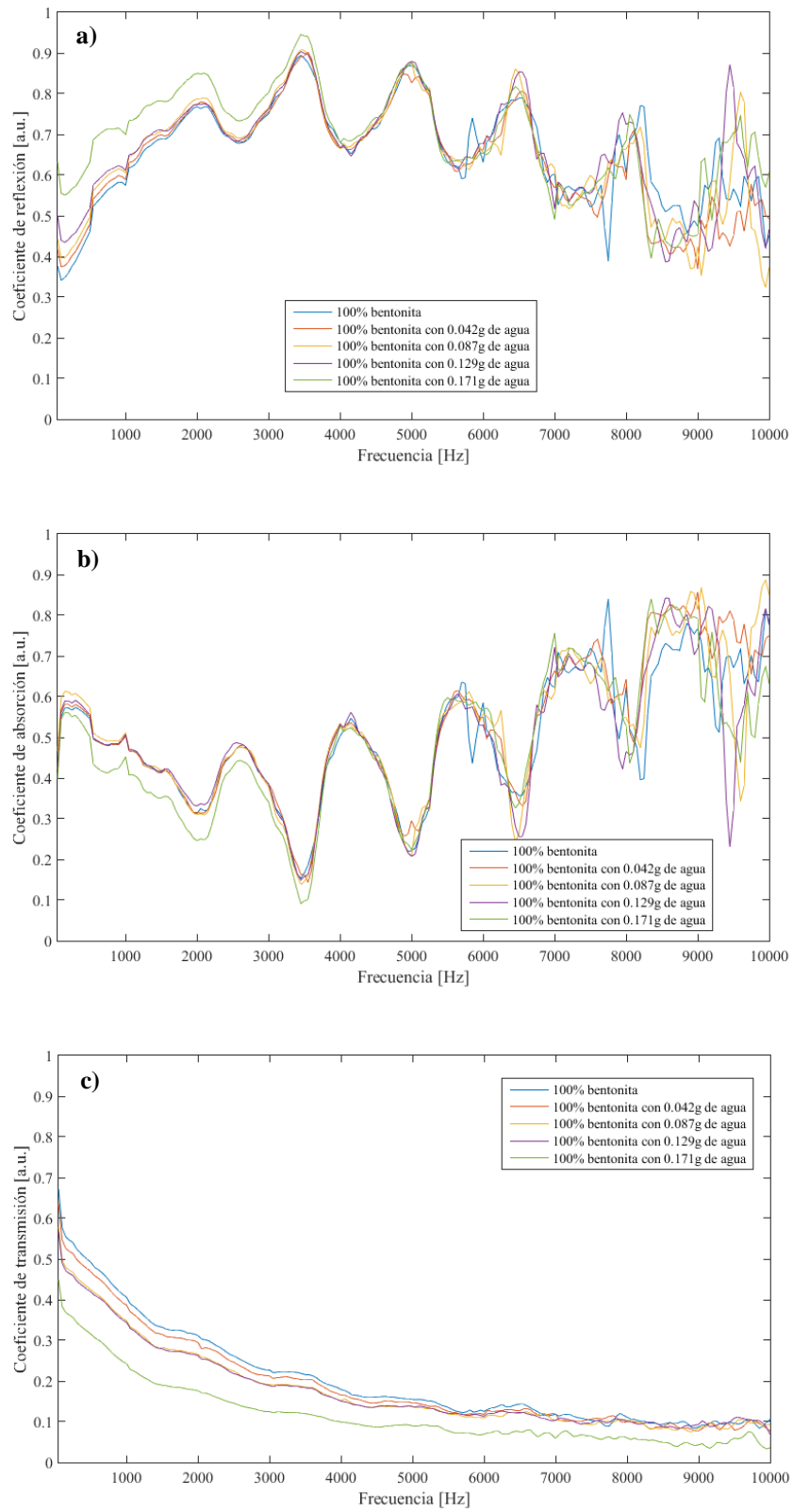


Figura 43. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión de la bentonita al aumentar la humedad superficial.

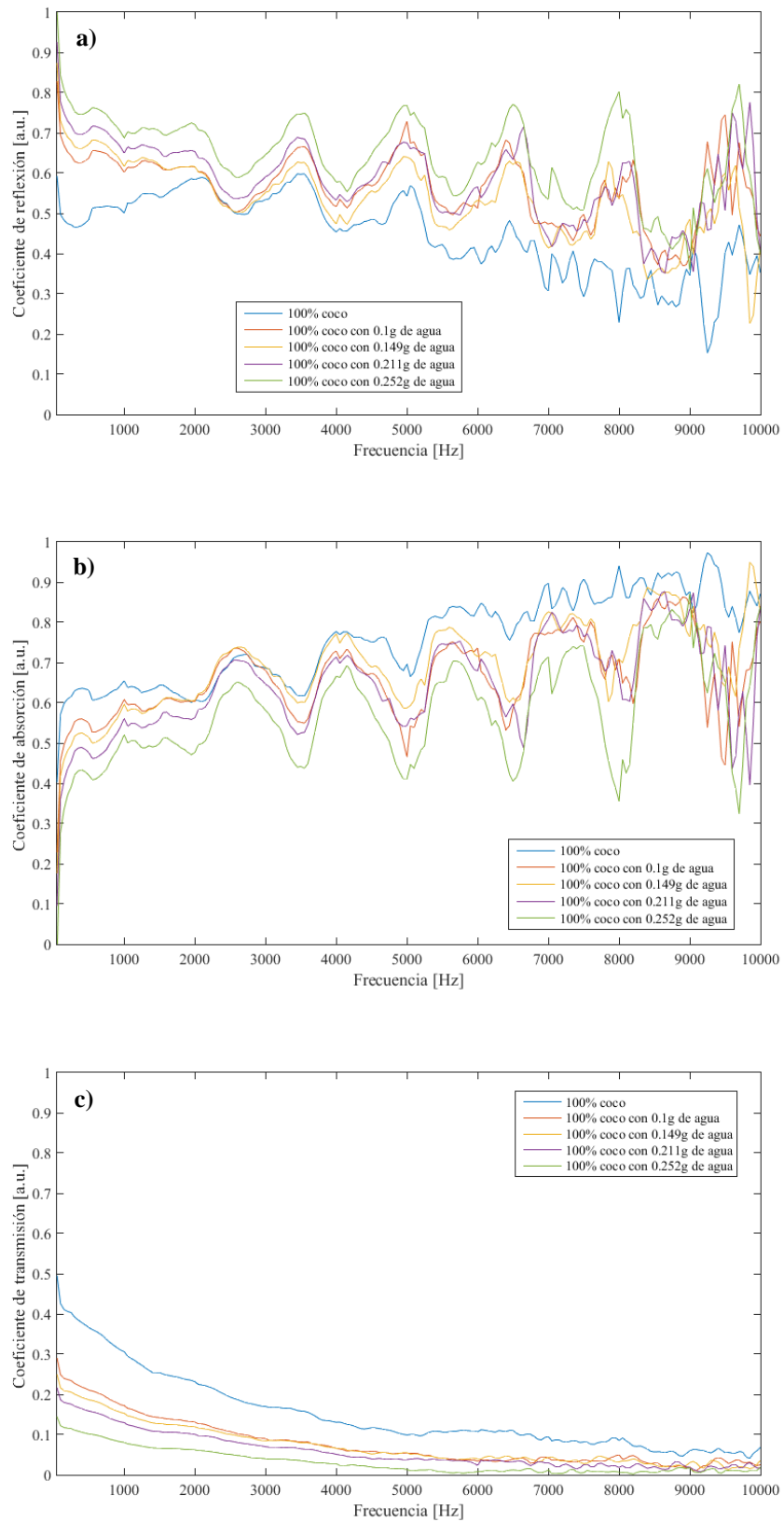


Figura 44. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión de la fibra de coco al aumentar la humedad superficial.

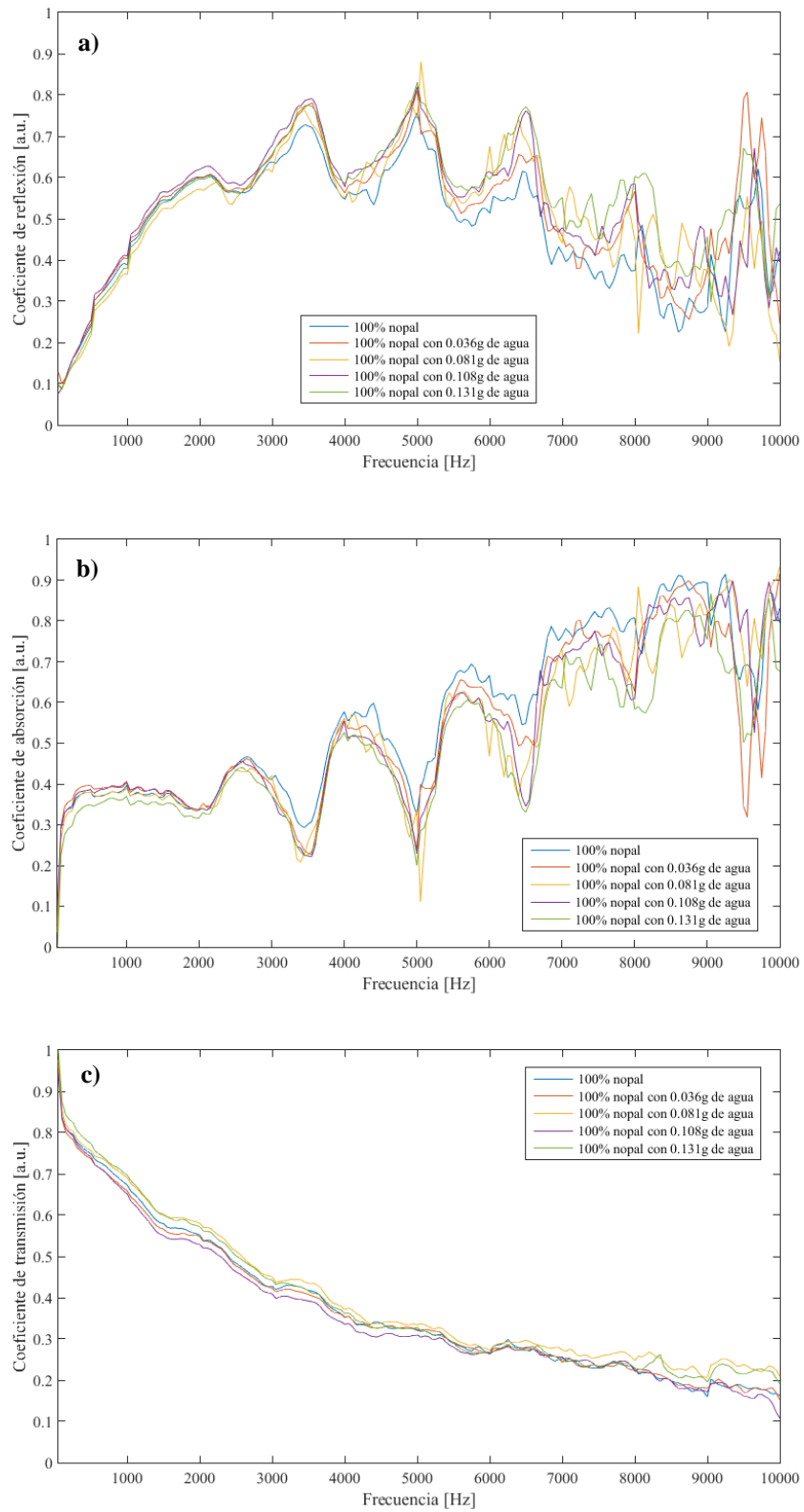


Figura 45. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión de la fibra de nopal al aumentar la humedad superficial.

Debido a que el compósito elaborado de 75% fibra y 25 % bentonita presenta adecuadas propiedades acústicas, se llevó cabo el análisis acústico del efecto de humedad superficial. A partir de los resultados obtenidos se observa que el compósito de 75% fibra de coco y 25% bentonita, Figura 46a, presentó un incremento muy considerable en su coeficiente de reflexión, es decir, este incremento en función al número de gotas aplicadas. Por lo que respecta al coeficiente de absorción y transmisión, Figura 46b y 46c, sus magnitudes disminuyeron al incrementar la humedad superficial. Cabe destacar que para este compósito su coeficiente de transmisión se reduce a valores muy pequeños al añadir cuatro gotas.

El análisis de la humedad superficial para el compósito de 75% nopal y 25% bentonita (Figura 47) no presentó diferencias significativas en sus coeficientes acústicos, a diferencia cuando se tiene la mayor cantidad de gotas de agua añadidas sobre la superficie y para un rango de frecuencias por debajo de los 2000 Hz. En este caso el coeficiente de reflexión aumenta ligeramente, mientras que el coeficiente de absorción y transmisión disminuye. Las gráficas de humedad de los compósitos restantes se colocaron en el Anexo C.

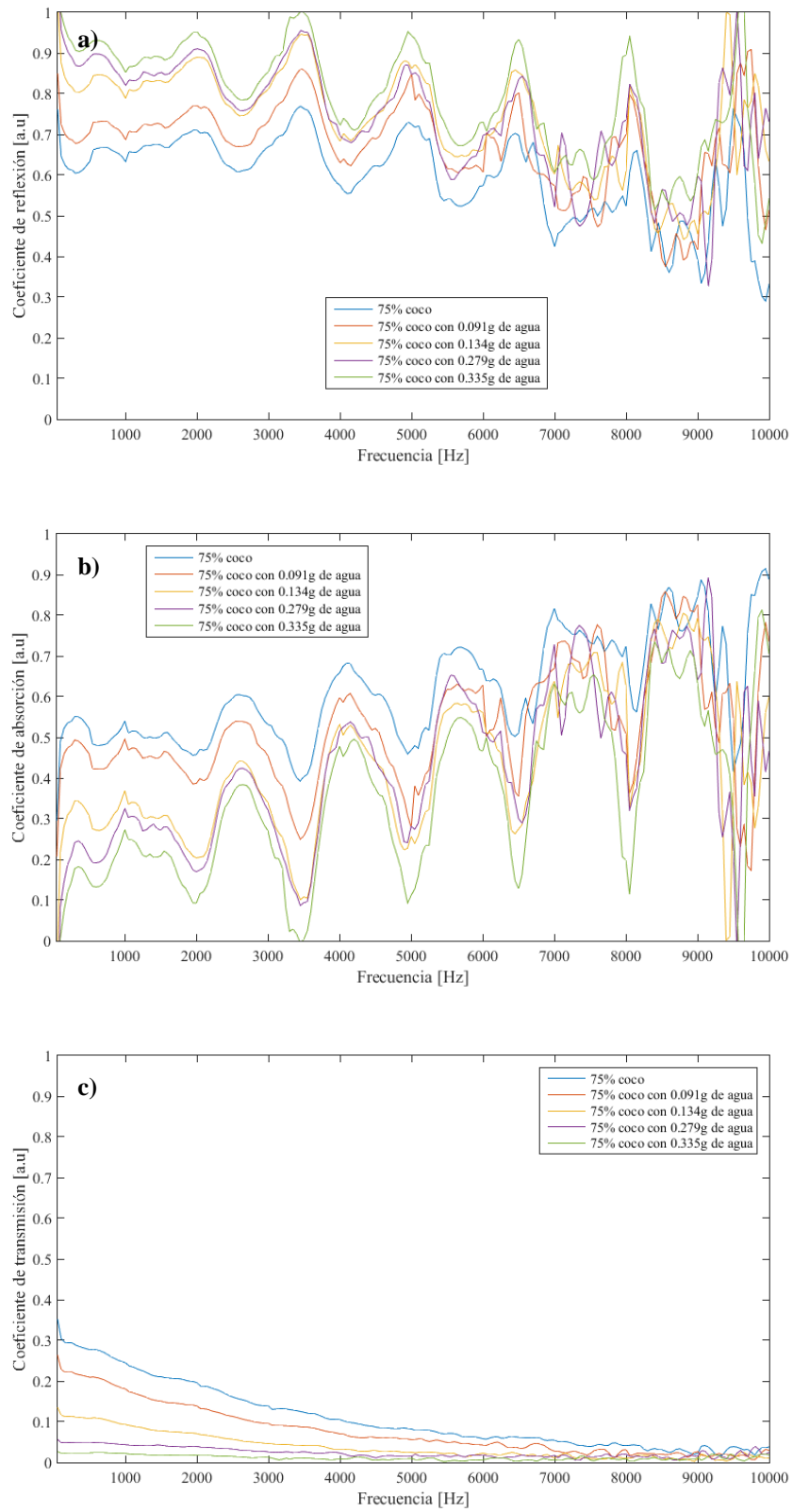


Figura 46. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión 75% fibra de coco y 25% bentonita al aumentar la humedad superficial.

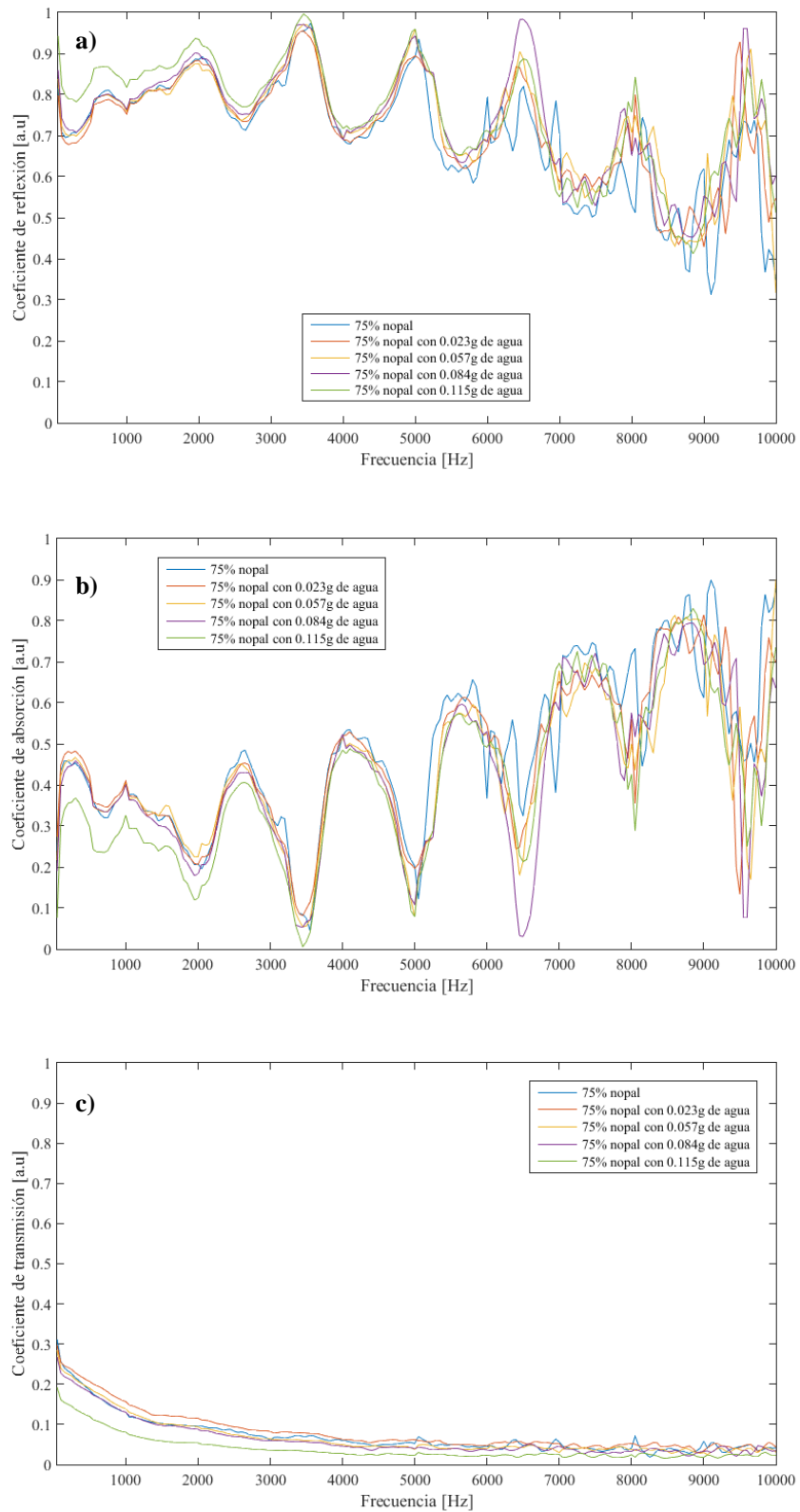


Figura 47. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión 75% fibra de nopal y 25% bentonita al aumentar la humedad superficial.

## 5.5 Comparación del compósito de 75 % coco y 25% bentonita con materiales comerciales

Los materiales más usados comercialmente para aplicaciones de acondicionamiento acústico son la fibra de vidrio y espuma de poliuretano debido a que estas cuentan con buenas propiedades de absorción acústica, como se muestra en la Tabla 10 los materiales se pueden clasificar con base en su coeficiente de absorción siguiendo la norma ISO 11654.

Tabla 10. Clases de absorción de sonido.

Clase de absorción de sonido	Coefficiente de absorción ( $\alpha$ )
A	0.9, 0.95, 1
B	0.80, 0.85
C	0.60, 0.65, 0.70, 0.75
D	0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55
E	0.15, 0.20, 0.25
F	0, 0.5, 0.10

En este trabajo el material con mejores propiedades acústicas era la muestra de 75 % coco y 25% bentonita, por lo que se decidió realizar la comparación de este con los siguientes materiales comerciales: fibra de vidrio de 1 y 2 cm, espuma de poliuretano de 1 y 2.5 cm y tabla roca de 1 cm. En la Tabla 11 se muestran de los datos obtenidos a partir del tubo de impedancias para cada uno de los materiales estudiados, cabe resaltar que las frecuencias que se reportan en la Tabla 10 son las que establece la norma ISO 11654 [76].

Tabla 11. Coeficientes de absorción de fibra de vidrio, tabla roca, poliuretano y el compósito de 75 % coco y 25% bentonita

Material	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fibra de vidrio 1 cm	0.53	0.55	0.56	0.58	0.60	0.74
Fibra de vidrio 2 cm	0.60	0.61	0.63	0.71	0.77	0.9
Espuma de poliuretano 1 cm	0.35	0.38	0.42	0.44	0.49	0.65
Espuma de poliuretano 2.5 cm	0.44	0.46	0.50	0.55	0.6	0.76
Tabla roca 1 cm	0.49	0.50	0.47	0.38	0.27	0.5
75 % coco y 25% bentonita 1cm	0.52	0.54	0.52	0.50	0.47	0.63

Como se puede observar en la Tabla 10 el material con mejores propiedades de absorción acústica sería la muestra de fibra de vidrio de 2 cm ya que esta presenta las mejores propiedades de absorción para todas las frecuencias, mientras que la tabla roca es el material con coeficientes de absorción más bajos. En cuanto al compuesto, este presenta un coeficiente de absorción mayor que el de la tabla roca, en comparación con la espuma de poliuretano se tiene valores de absorción similares em todas las frecuencias y para el caso de la fibra de vidrio, la absorción por debajo de los 1000 Hz es parecida, sin embargo, para 2000 y 4000 Hz la fibra de vidrio presenta una mayor absorción acústica, con base en la Tabla 9, el compuesto de coco, la espuma de poliuretano y la tabla roca se clasificaría como clase D, mientras que la fibra de vidrio sería un material de clase C.

En la Tabla 12 y 13 se presenta una comparación de las propiedades acústicas de los materiales comerciales y el compuesto para reflexión y transmisión respectivamente.

Tabla 12. Coeficientes de reflexión de fibra de vidrio, tabla roca, poliuretano y el compuesto de 75 % coco y 25% bentonita

Material	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fibra de vidrio 1 cm	0.28	0.29	0.30	0.29	0.32	0.29
Fibra de vidrio 2 cm	0.39	0.39	0.40	0.35	0.34	0.22
Espuma de poliuretano 1 cm	0.09	0.10	0.12	0.14	0.11	0.11
Espuma de poliuretano 2.5 cm	0.14	0.15	0.18	0.17	0.19	0.18
Tabla roca 1 cm	0.57	0.58	0.64	0.74	0.82	0.68
75 % coco y 25% bentonita 1cm	0.53	0.54	0.58	0.64	0.68	0.60

En cuanto a las propiedades de reflexión de los materiales comerciales (Tabla 11), la tabla roca es la que destaca debido a que refleja la mayor cantidad de sonido que incide sobre el material, seguido del compuesto el cual tienes valores de reflexión muy cercanos a la tabla roca, mientras que la espuma de poliuretano y la fibra de vidrio presentan coeficientes de reflexión menores que van aumentando con el espesor de la muestra, pero la cantidad de sonido que es reflejada por estos materiales es muy baja, ya que se encuentra por debajo de los 0.4 de amplitud para la fibra de vidrio y de los 0.2 para el poliuretano.

Tabla 13. Coeficientes de transmisión de fibra de vidrio, tabla roca, poliuretano y el compósito de 75 % coco y 25% bentonita

Material	Frecuencia (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Fibra de vidrio 1 cm	0.60	0.60	0.59	0.57	0.53	0.41
Fibra de vidrio 2 cm	0.46	0.47	0.45	0.42	0.34	0.20
Espuma de poliuretano 1 cm	0.78	0.77	0.75	0.72	0.70	0.57
Espuma de poliuretano 2.5 cm	0.71	0.71	0.68	0.64	0.59	0.45
Tabla roca 1 cm	0.36	0.35	0.31	0.25	0.20	0.12
75 % coco y 25% bentonita 1cm	0.40	0.39	0.36	0.30	0.21	0.11

Finalmente, en las propiedades de transmisión presentadas en la Tabla 13, se tiene que la tabla roca como el compósito reducen la mayor cantidad de sonido después de atravesar el material, debido a que presentan valores de transmisión inferiores a 0.4 que decaen con el aumento de la frecuencia, por lo que sus propiedades acústicas de transmisión son mejores que las de las muestras de fibra de vidrio y espuma de poliuretano.

A través de estos resultados se tiene que el compósito obtenido no presenta propiedades de absorción superiores a los de los materiales comerciales más utilizados, pero cuenta con valores muy cercanos, sin embargo, si la aplicación que se le desea dar al material es para generar el acondicionamiento acústico dentro de un recinto, este cuenta con mejores propiedades acústicas de reflexión y reducción del sonido que la fibra de vidrio y espuma de poliuretano.

### 5.6 Respuesta al impulso

Después de determinar los coeficientes acústicos en el dominio de la frecuencia de los materiales se determinó su respuesta al impulso, que se considera como la huella del material en el dominio del tiempo. En la Figura 48 se ilustra la respuesta en tiempo obtenida para el compósito de 75 % fibra de coco y 25 % bentonita.

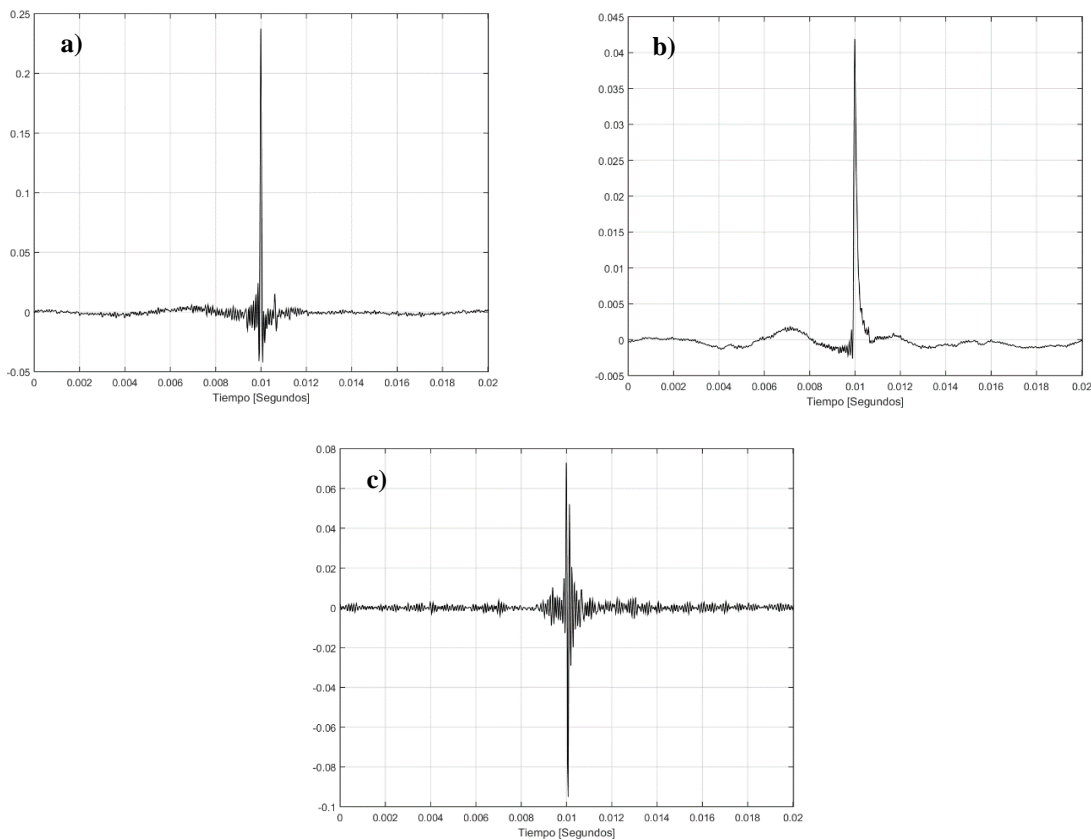


Figura 48. Respuesta al impulso del compuesto de 75 % fibra de coco y 25 % bentonita a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.

La respuesta al impulso se utilizó para evaluar el comportamiento acústico del compuesto, al hacer incidir el sonido de una campana. En la Figura 49 se muestra una gráfica donde se comparan los coeficientes acústicos de los materiales de referencia y el compuesto elaborado con 75% coco y 25% bentonita; así como la respuesta en frecuencia del sonido de una campana, en esta se observa como el sonido de la campana este compuesto por diversos picos ubicados a distintas frecuencias en el rango de los 2000 a 9000 Hz, siendo el pico más intenso ubicado a un a frecuencia de 2700 Hz, centrándonos en este pico se elaboró la Tabla 14. Como se puede observar en la tabla, en cuanto a las propiedades de reflexión el material que refleja una mayor cantidad del sonido de la campana sería la muestra de bentonita, ya que para la frecuencia de 2800 Hz esta estaría reflejando el sonido con una intensidad de 0.76 que es mayor en comparación la bentonita la cual reflejaría solo el 0.61 de la intensidad recibida por el sonido de la campana, para el caso de la absorción la muestra que disipara la mayor cantidad de sonido sería la fibra de coco, ya que esta presenta un coeficiente de 0.6

que es mayor que el del compuesto y la arcilla, finalmente en propiedades de transmisión, lo que se busca es que el material deje pasar la menor cantidad del sonido generado, la fibra coco cuenta con el mejor coeficiente de transmisión, ya que reduciría el sonido a una intensidad inferior a 0.09, por lo que este se consideraría el material más adecuado para aislar un recinto del sonido de una campana. Es importante destacar que este análisis se puede realizar con sonidos diferentes al de una campana, los cuales contarán con un espectro en frecuencia diferente, por lo que es importante realizar el estudio del material con diversos sonidos característicos a los que está expuesto un recinto, para evaluar su viabilidad como un material de aislamiento o acondicionamiento acústico.

*Tabla 14. Coeficientes acústicos de la fibra de coco, la bentonita y del compuesto de 75 % fibra de coco y 25 % bentonita a 2800 Hz.*

Material	Frecuencia 2700 Hz		
	c. reflexión	c. absorción	c. transmisión
100% coco	0.61	0.60	0.09
75% coco y 25% bentonita	0.65	0.54	0.16
100% bentonita	0.76	0.37	0.23

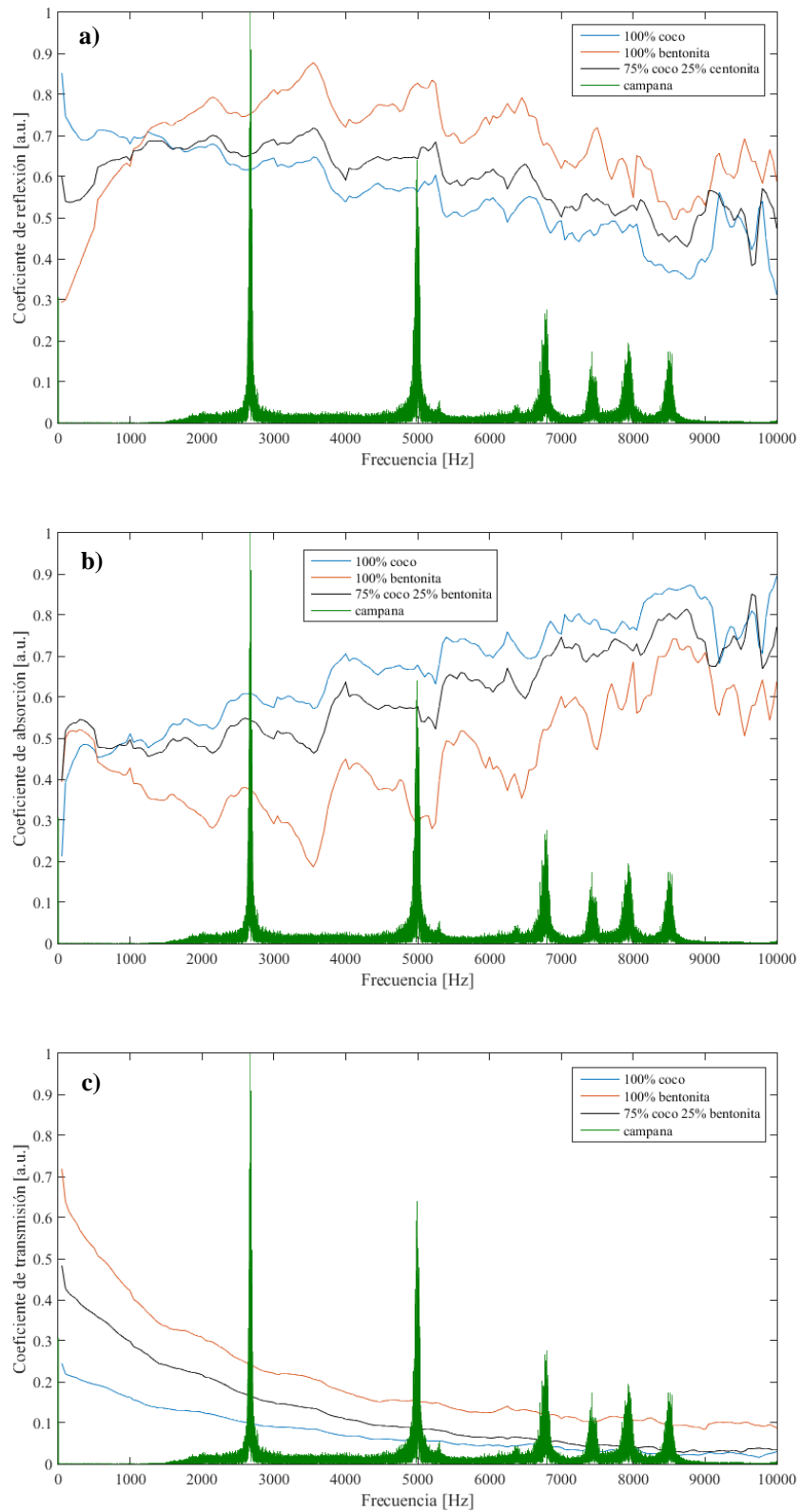


Figura 49. Comparación de la respuesta en frecuencia de la campana con los coeficientes acústicos de la bentonita, fibra de coco y el compuesto de 75 % fibra de coco y 25 % bentonita.

Debido a que se conoce la señal de entrada y la respuesta al impulso de los coeficientes acústicos, se realizó un modelo del comportamiento de los materiales ante el sonido generado haciendo uso de la convolución para estimar la respuesta acústica, posteriormente se usó la transformada inversa de Fourier para llevar esta señal al dominio del tiempo, en la Figura 50 se muestra la respuesta de la bentonita, la fibra de coco y el compósito de 75 % fibra de coco y 25 % bentonita ante el estímulo de la campana. Como se puede observar en las gráficas, el comportamiento acústico de los materiales corresponde a los resultados obtenidos en la Tabla 14, el material que refleja la mayor parte del sonido es la bentonita, debido a que la amplitud de la señal reflejada es de 0.3, seguido del compósito de coco y finalmente la fibra sola. En cuanto a la transmisión y absorción, la muestra de 100% coco presenta las mejores propiedades, ya que este reduce la amplitud de la señal por debajo de 0.02 y absorbe una mayor cantidad de sonido con respecto a la bentonita, las cuales presentan una amplitud de absorción de 0.15 y menor a los 0.06 respectivamente. Las gráficas de la respuesta al impulso de los otros materiales estudiados se encuentran en el Anexo 4.

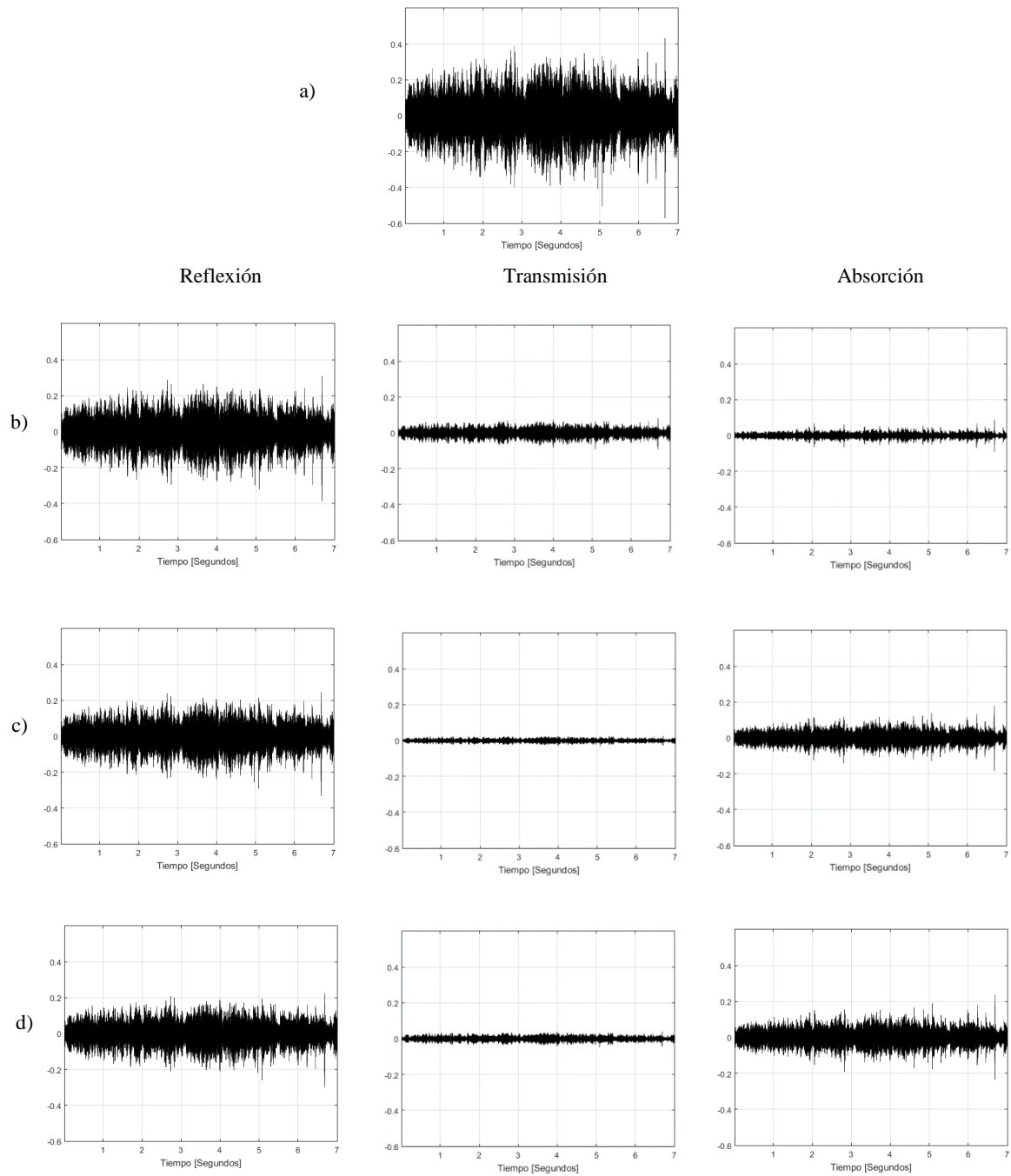


Figura 50. Gráficas de: a) la señal de la campana, b), c) y d) respuesta acústica de la muestra de 100% bentonita, 75% coco-25 % bentonita y 100% coco respectivamente.

# Conclusiones

En este trabajo se sintetizaron 6 compósitos de bentonita reforzados con fibras de coco y nopal variando el porcentaje en 25 %. Los resultados del DRX mostraron que la bentonita estaba compuesta por 59.15 % montmorillonita, 25.33% cuarzo y 7.22% feldespatos, además que el tamaño de cristal obtenido indicó que la bentonita tenía componentes del orden nanométrico que disminuyen ligeramente con la calcinación. Estos componentes son característicos de las arcillas comerciales y naturales, que se utilizan en materiales de construcción.

A través del FTIR se identificó la presencia significativa de montmorillonita en la bentonita, mientras que en las fibras de nopal o coco se identificó la presencia de hemicelulosa, celulosa y lignina, cabe resaltar que en la fibra de nopal también se identificó la presencia de mucilago, lo cual modificó las propiedades de las fibras. La lignina permitió la adherencia de la arcilla con las fibras en los materiales compósitos y se corroboró que las fibras de nopal y coco contienen diferentes grupos funcionales, que cambian la forma en la que se aglomeran las fibras. Se determinó que entre mayor sea la intensidad de la banda del grupo -OH mayores interacciones tendrán las fibras entre ellas, lo que dificultará su dispersión en el compósito.

El análisis termogravimétrico de los precursores demostró que la bentonita era el material con mayor estabilidad seguido de las fibras, siendo la fibra de nopal más estable que la de coco. Lo que es de esperarse dada la naturaleza biológica de las fibras, sin embargo, se encontró que la bentonita proporciona una mayor estabilidad térmica a los compósitos, lo que permitiría aplicar este tipo de materiales en recubrimientos que requieran una resistencia al calor, por lo menos hasta 300 ° C.

Las fibras de coco se analizaron mediante microscopía óptica, ya que su tamaño es de  $0.1613 \pm 0.09$  mm, en este sentido la forma en la que se compone el compósito es parecida a la de un material de compuesto, donde la arcilla constituye la matriz del material y las fibras son el refuerzo. Este material se caracteriza por tener defectos que pueden frenar el paso de las ondas de sonido. Las fibras de nopal se identificaron mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido, y se encontraron diámetros entre los 71.8 y 219.7 nm. La diferencia entre estas fibras radica en la presencia de mucilago, el cual es un biopolímero que genera gran adherencia, esto aumentó la dureza de los compósitos que se obtuvieron en las mismas concentraciones de fibras. Es decir, la composición 75% de coco y 25 % de bentonita tiene una dureza de 20.60 mientras que, para la misma composición, pero con nopal la dureza fue

de 25.83, lo mismo ocurre para la densidad, esto indica que la compactación también depende de la presencia de dicho componente. Adicionalmente, se tiene que existe una relación de proporcionalidad entre la de la dureza y la densidad con el aumento de la cantidad de bentonita en la muestra, lo que es de esperarse dadas las propiedades de la arcilla.

La metodología utilizada permitió evaluar de manera detallada la respuesta acústica de cada una de las muestras caracterizadas para identificar variaciones relacionadas con su composición. Las propiedades acústicas de los compósitos y los materiales de referencia mostraron que la fibra de coco presentó mejores propiedades para absorción y reducción de sonido, la bentonita cuenta con el mayor coeficiente de reflexión y el nopal se encontraba en un punto intermedio de estos dos materiales. Con los resultados obtenidos se consideró que la composición de 75% fibra y 25 % bentonita presentaron coeficientes más balanceados, ya que la reflexión de sonido era similar al de la bentonita, mientras que la reducción y absorción tenían amplitudes muy cercanas a las de las fibras. La dureza y densidad se pueden relacionar con las propiedades acústicas ya que entre menor sea la densidad y dureza de las muestras, el coeficiente de absorción será mayor. A través de las pruebas de humedad, se demostró que el coco reduce su coeficiente de absorción cuando se presenta mayor cantidad de agua tenga en la superficie, mientras que la fibra de nopal no presenta cambios en sus propiedades acústicas. El análisis realizado permitió modelar la respuesta acústica de un sonido característico cuando impacta el material para evaluar su aplicación en acondicionamiento, aislamiento y reducción de ruido. Finalmente, al hacer la comparación de las propiedades acústicas entre los dos tipos de fibra, se determinó que la fibra de coco cuenta con mejores propiedades para aplicaciones de aislamiento acústico, mientras que el nopal sería más viable para acondicionamiento acústico, este resultado se atribuye a menor compactación de los compósitos de coco derivado de la presencia de mucilago en el nopal.

Con este trabajo es posible predecir las propiedades fisicoquímicas y acústicas que tendrán diferentes compósitos en función de su composición, para que a partir de esto la implementación se realice bajo un diseño deseado.

## Trabajo a futuro

Con la finalidad de continuar con el desarrollo de este trabajo para mejorar las propiedades acústicas, se plantean los siguientes puntos:

Realizar el prensado de las muestras con un equipo que ejerza una mayor presión con la finalidad de adquirir muestras más uniformes. Obtener un modelo teórico, capaz de predecir las propiedades fisicoquímicas y acústicas de los compósitos, para generar materiales con respuesta acústica particular.

Estudiar las propiedades mecánicas del material mediante pruebas de fuerza compresiva, abrasión y contracción lineal, para determinar su viabilidad como ladrillo.

Implementar el proceso de caracterización en una cámara reverberante para comparar sus propiedades de absorción con un panel construido.

## Referencias

- [1] Centro Nacional de Metrología (CENAM), «Gobierno de México», [En línea]. Available: <https://www.cenam.mx/FYP/Dureza/Dur1.aspx>. [Último acceso: 4 Agosto 2022].
- [2] F. Miyara, «Introducción a la acústica», [En línea]. Available: <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/audio/acustica.pdf>. [Último acceso: 4 Agosto 2022].
- [3] L. H. Escobar Salguero, Conceptos básicos de procesamiento digital de señales, México: UNAM, 2008.
- [4] S. Dreger, N. Meyer, H. Fromme y G. Bolte, «Environmental noise and incident mental health problems: A prospective cohort study among school children in Germany», *Environmental Research*, vol. 143, n° A, pp. 49-54, 2015.
- [5] A. Adekunle Faiyetole, T. Sivowaku y Johnson, «The effects of aircraft noise on psychosocial health», *Journal of Transport & Health*, vol. 22, pp. 1-19, 2021.
- [6] W.-W. Bao, W.-X. Xue, N. Jiang, S. Huang, S.-X. Zhang, Y. Zhao, Y.-C. Chen, G.-H. Dong, M. Cai y Y.-J. Chen, «Exposure to road traffic noise and behavioral problems in Chinese schoolchildren: A cross-sectional study», *Science of The Total Environment*, vol. 837, pp. 1-9, 2022.
- [7] J. Choi, J. Hong, H. Kang, T. Hong, H. Seon Park y D.-E. Lee, «An automatic decision model for optimal noise barrier plan in terms of health impact, productivity, and cost aspects», *Building and Environment*, vol. 216, pp. 1-21, 2022.

- [8] O. Hernández Peña, G. Hernández Montero y E. López Rodríguez, «Ruido y salud», *Revista Cubana de Medicina Militar*, pp. 929-939, 2018.
- [9] P. Ekow Baffoe, A. Allan Duker y E. V. Senkyire Kwarteng, «Assessment of health impacts of noise pollution in the Tarkwa Mining Community of Ghana using noise mapping techniques», *Global Health Journal*, pp. 2-11, 2022.
- [10] Organización Mundial de la Salud Europa, «Organización Mundial de la Salud Europa», 2018. [En línea]. Available: <https://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [11] Gaceta Oficial del Distrito Federal, «Norma Ambiental para el Distrito Federal, NADF-005-AMBT-2013», 29 Diciembre 2014. [En línea]. Available: [http://www.paot.org.mx/centro/normas\\_a/2014/GODF\\_29\\_12\\_2014.pdf](http://www.paot.org.mx/centro/normas_a/2014/GODF_29_12_2014.pdf). [Último acceso: 24 Abril 2021].
- [12] M. Alfie Cohen y O. Salinas Castillo, «Ruido en la ciudad. Contaminación auditiva y ciudad caminable», *Estudios demográficos urbanos*, pp. 65-96, 2017.
- [13] X. Tang y X. Yan, «Acoustic energy absorption properties of fibrous materials: A review», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 101, pp. 360-380, 2017.
- [14] T. Yang, L. Hu, X. Xiong, M. Petru, M. Tayyab Noman, R. Mishra y J. Militký, «Sound Absorption Properties of Natural Fibers: A Review», *Sustainability*, vol. 12(20), pp. 1-11, 2020.
- [15] K. Lawrence E., A. R. Frey, A. B. Coppens y J. V. Sanders, *Fundamentos de acústica*, Limusa, 1990.
- [16] M. Zarastvand, M. Ghassabi y R. Talebitooti, «A Review Approach for Sound Propagation Prediction of Plate Constructions», *Archives of Computational Methods in Engineering*, pp. 1-27, 2020.
- [17] Comisión de Audiología de la Sociedad Española de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello (SEORL-CCC), «¿Cuáles son los ruidos más dañinos?», [En línea]. Available: <https://seorl.net/ruidos-daninos-audicion/>.
- [18] J. S. Gordillo Gordillo y L. E. Guaraca Ochoa, *Artists, Determinación de niveles de presión sonora (NPS) generados por las aeronaves, en el sector sur del aeropuerto Mariscal La Mar de la ciudad de Cuenca [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca]*. [Art]. Repositorio Institucional, 2015.
- [19] Organización Mundial de la Salud, «Organización Mundial de la Salud», 27 Febrero 2015. [En línea]. Available: <https://www.who.int/es/news/item/12-02-2019-new-who-itu-standard-aims-to-prevent-hearing-loss-among-1.1-billion-young-people>. [Último acceso: 12 Diciembre 2021].
- [20] Gaceta Oficial del Distrito Federal, «Ley Ambiental de Protección a la Tierra del Distrito Federal», 8 Septiembre 2017. [En línea]. Available:

[http://paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2018/LEY\\_AMBIENTAL\\_PROTECCION\\_TIERRA\\_08\\_09\\_2017.pdf](http://paot.org.mx/centro/leyes/df/pdf/2018/LEY_AMBIENTAL_PROTECCION_TIERRA_08_09_2017.pdf). [Último acceso: 24 Abril 2021].

- [21] Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, «Programa ! Ya bájale!», 2020. [En línea]. Available: [https://paot.org.mx/micrositios/sabias\\_que/RUIDO/programa.html](https://paot.org.mx/micrositios/sabias_que/RUIDO/programa.html). [Último acceso: 28 Marzo 2022].
- [22] R. Cruz Cecilio, E. R. Vázquez Cerón y L. A. Lancón Rivera, «Filtro digital de los coeficientes acústicos en materiales sólidos en un tubo de impedancia con dos cámaras acústicas», *Pistas Educativas*, n° 130, pp. 377-392, 2018.
- [23] U. Victoria Martínez, Caracterización de las propiedades acústicas a partir del método de tubo de impedancia del bambú guadua angustifolia [Tesis de licenciatura], *Repositorio Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco*, 2020.
- [24] M. Faraldos y C. Goberna, Técnicas de análisis y caracterización de Materiales, Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), 2011.
- [25] Universidad Politécnica de Cartagena, «Difracción de rayos X. Introducción», [En línea]. Available: [https://www.upct.es/~minaees/difraccion\\_rayosx.pdf](https://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf). [Último acceso: 28 Marzo 2022].
- [26] B. Mohammadi, A. Safaiyan, P. Habibi y G. Moradi, «Evaluation of the acoustic performance of polyurethane foams embedded with rock wool fibers at low-frequency range; design and construction», *Applied Acoustics*, vol. 182, pp. 1-8, 2021.
- [27] N. Bhingare y S. Prakash, «An experimental and theoretical investigation of coconut coir material for sound absorption characteristics», *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-7, 2020.
- [28] M. Ghorbani, B. Dahrazma, S. Fazlollah Saghravani y G. Yousofizinsaz, «A comparative study on physicochemical properties of environmentally-friendly lightweight bricks having potato peel powder and sour orange leaf», *Construction and Building Materials*, vol. 276, pp. 1-12, 2021.
- [29] M. Degrave Lemeurs, P. Glé y A. Hellouin de Menibus, «Acoustical properties of hemp concretes for buildings thermal insulation: Application to clay and lime binders», *Construction and Building Materials*, vol. 160, pp. 462-474, 2018.
- [30] A. V. Nadal Gisbert, R. Maderuelo Sanz, J. E. Crespo Amorós, M. Martín Castizo, F. J. Parrés García y E. Juliá Sanchís, «Comportamiento acústico de arlita y perlita aglutinadas con diferentes proporciones de resina de poliuretano», *VIII congreso Ibero-americano de acústica*, pp. 1-6, 2012.
- [31] E. Attal, Y. Buot de l'Epine, N. Dauchez y B. Dubus, «Experimental investigation of the effect of moisture on the acoustic properties of lightweight substrates used in green envelopes», *Applied Acoustics*, vol. 180, pp. 1-12, 2021.
- [32] J. P. Arenas, J. L. Castaño, L. Troncoso y M. L. Auad, «Thermoplastic polyurethane/laponite nanocomposite for reducing impact sound in a floating floor», *Applied Acoustics*, vol. 155, pp. 401-406, 2019.

- [33] C. Simón Herrero, N. Peco, A. Romero, J. L. Valverde y L. Sánchez Silva, «PVA/nanoclay/graphene oxide aerogels with enhanced sound absorption properties», *Applied Acoustics*, vol. 156, nº 40-45, 2019.
- [34] T. Astrauskas, T. Januševičius y R. Grubliauskas, «Acoustic Panels Made of Paper Sludge and Clay Composites», *Sustainability*, nº 13(2), 637, pp. 1-10, 2021.
- [35] C. Arslan, O. Gencil, I. Borazan, M. Sutcu y E. Erdogmus, «Effect of waste-based micro cellulose fiber as pore maker on characteristics of fired clay bricks», *Construction and Building Materials*, pp. 1-12, 2021.
- [36] H. Limami, I. Manssouri, K. Cherkaoui, M. Saadaoui y A. Khaldoun, «Thermal performance of unfired lightweight clay bricks with HDPE & PET waste plastics additives», *Journal of Building Engineering*, vol. 30, pp. 1-12, 2020.
- [37] S. Lawanwadeekul, T. Otsuru, R. Tomiku y H. Nishiguchi, «Thermal-acoustic clay brick production with added charcoal for use in Thailand», *Construction and Building Materials*, vol. 225, pp. 1-13, 2020.
- [38] R. M. Novais, L. Senff, J. Carvalheiras, A. M. Lacasta, I. R. Cantalapiedra y J. A. Labrincha, «Simple and effective route to tailor the thermal, acoustic and hygrothermal properties of cork-containing waste derived inorganic polymer composites», *Journal of Building Engineering*, vol. 42, pp. 1-11, 2021.
- [39] O. Olofinnade y J. Ogara, «Workability, strength, and microstructure of high strength sustainable concrete incorporating recycled clay brick aggregate and calcined clay», *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 3, pp. 1-10, 2021.
- [40] A. Abdel Hakim, E. H. Awad, K. F. El Nemr y T. M. El Basheer, «Impact of gamma radiation and multi-walled carbon nanotubes on the mechanical and acoustical properties of reinforced sisal fiber/polyester resin composites», *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 189, pp. 1-9, 2021.
- [41] M. Pereira, J. Carbajo, L. Godinho, J. Ramis y P. Amado Mendes, «Improving the sound absorption behaviour of porous concrete using embedded resonant structures», *Journal of Building Engineering*, vol. 35, pp. 1-10, 2021.
- [42] I. Reyes Jaramillo, «Las arcillas: barro, creación, vida y arte», *Departamento de Biología de la División de Ciencias Biológicas y de la Salud, UAM-I.*, pp. 24-32, 2000.
- [43] S. Li, B. Mu, X. Wang y A. Wang, «Recent researches on natural pigments stabilized by clay minerals: A review», *Dyes and Pigments*, vol. 190, pp. 1-11, 2021.
- [44] S. Dadari, M. Rahimi y S. Zinadini, «Novel antibacterial and antifouling PES nanofiltration membrane incorporated with green synthesized nickel-bentonite nanoparticles for heavy metal ions removal», *Chemical Engineering Journal*, vol. 431, nº 2, pp. 1-22, 2021.
- [45] I. Dalponte Dallabona, Á. Luiz Mathias y R. M. Matos Jorge, «A new green floating photocatalyst with Brazilian bentonite into TiO<sub>2</sub>/alginate beads for dye removal», *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 627, pp. 1-14, 2021.

- [46] S. Pandey, «A comprehensive review on recent developments in bentonite-based materials used as adsorbents for wastewater treatment», *Journal of Molecular Liquids*, vol. 241, pp. 1-23, 2017.
- [47] SubSecretaría de Minería, «Bentonita», Diciembre 2017. [En línea]. Available: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287791/Perfil\\_Bentonita\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287791/Perfil_Bentonita_2017.pdf). [Último acceso: 24 Abril 2021].
- [48] J. J. Moreno Vigara y R. A. Peinado Amores, *Química enológica*, Mundiprensa, 2010.
- [49] M. Jawaid, S. Sand Chee, M. Asim, N. Saba y S. Kalia, «Sustainable kenaf/bamboo fibers/clay hybrid nanocomposites: properties, environmental aspects and applications», *ournal of Cleaner Production*, vol. 30, pp. 1-12, 2022.
- [50] B. Wang, L. Yan y B. Kasal, «A review of coir fibre and coir fibre reinforced cement-based composite materials (2000–2021)», *Journal of Cleaner Production*, vol. 338, pp. 1-28, 2022.
- [51] Senado de la República, «artículo 179 de la Ley de Desarrollo Rural Sustentable», [En línea]. Available: <https://infosen.senado.gob.mx/infosen64/index.php>.
- [52] O. A. Jiménez Arévalo, A. de la Cruz Marín, A. Escamilla Martínez y M. Trujillo, «Obtención de fibras de nopal para su utilización en composites», *Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, pp. 1-9, 2010.
- [53] A. A. Torres Acosta y L. A. Díaz Cruz, «Concrete durability enhancement from nopal (opuntia ficus-indica) additions», *Construction and Building Materials*, vol. 243, pp. 1-8, 2020.
- [54] C. Arslan, O. Gencil, I. Borazan, M. Sutcu y E. Erdogmus, «Effect of waste-based micro cellulose fiber as pore maker on characteristics of fired clay bricks», *Construction and Building Materials*, vol. 300, pp. 1-12, 2021.
- [55] U. Javed, R. Arsalan Khushnood, S. Ali Memon, F. E. Jalal y M. Saeed Zafar, «Sustainable incorporation of lime-bentonite clay composite for production of ecofriendly bricks», *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, pp. 1-21, 2020.
- [56] U. Victoria Martínez, E. R. Vázquez Cerón, D. Saldaña Cantarey, L. A. Lancón Rivera, R. Villeda Ayala, S. G. García Martínez y V. Arroyo Pedroza, «Caracterización acústica de bambú mediante análisis estacionario», *Revista del Centro de Graduados e Investigación, Instituto Tecnológico de Mérida*, vol. 35, n° 85, pp. 15-20, 2020.
- [57] U. Victoria Martínez, E. R. Vázquez Cerón, D. Saldaña Cantarey, R. Villeda Ayala, L. A. Lancón Rivera, S. G. García Martínez y V. Arroyo Pedroza, «Quantification of the acoustic response of a material using an amplitude modulated wave train», *Instrumentation Science & Technology*, vol. 50, n° 2, pp. 219-232, 2021.
- [58] A. Carrión Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectonicos*, España: UPC, 1998.
- [59] J. A. Torres Luna, J. G. Carriazo y N. R. Sanabria, «Synthesis and characterization of modified-bentonite with TiO<sub>2</sub> and Fe-TiO<sub>2</sub> species obtained from ilmenite», *Revista Colombiana de Química*, vol. 42, n° 1, pp. 44-50, 2013.

- [60] F. G. Alabarse, R. V. Conceição, N. M. Balzaretto, F. Schenato y A. M. Xavier, «In-situ FTIR analyses of bentonite under high-pressure», *Applied Clay Science*, pp. 202-208, 2011.
- [61] Y. Zhu, Y. Cui, Z. Shan, R. Dai, L. Shi y H. Chen, «Fabrication and characterization of a multi-functional and environmentally-friendly starch/organo-bentonite composite liquid dust suppressant», *Powder Technology*, pp. 532-543, 2021.
- [62] D. A. El Nagar y D. H. Sary, «Synthesis and characterization of nano bentonite and its effect on some properties of sandy soils», *Soil and Tillage Research*, pp. 1-7, 2021.
- [63] K. Benini, «Desarrollo y caracterización de compuestos poliméricos reforzados con fibras lignocelulósicas: fibra de la corteza de coco verde y bagazo de caña de azúcar», (*tesis de maestría*). Universidad Estatal Pualista, 2011.
- [64] R. Siva, K. Nikhil Kumar y S. Mupparaju, «Study on physicochemical properties and morphology of surface-modified and raw *Coccinia grandis* natural fiber», *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-5, 2021.
- [65] S. Sengupta y G. Basu, «Properties of Coconut Fiber», *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, Elsevier, pp. 263-281, 2016.
- [66] S. Nazir y I. A. Wani, «Functional characterization of basil (*Ocimum basilicum* L.) seed mucilage», *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, vol. 25, pp. 1-9, 2021.
- [67] B. Nabil, N. Messikh, S. Bousba, P. Magri, D. Faycal y R. Zaghdoudi, «Adsorption of Humic Acid from Aqueous Solution on Different Modified Bentonites», *Chemical Engineering Transactions*, vol. 60, pp. 1-7, 2017.
- [68] M. Sarkar, K. Dana, S. Ghatak y A. Banerjee, «Polypropylene-clay composite prepared from Indian bentonite», *Bulletin of Materials Science*, vol. 31, n° 1, pp. 23-28, 2008.
- [69] G. Bolio, A. Valadez, L. Veleza y A. Andreeva, «Cellulose whiskers from agro-industrial banana wastes: Isolation and characterization», *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 10, n° 2, pp. 291-299, 2011.
- [70] N. Camacho, R. Torres, J. Palacios, B. Paricaguán, J. Infante, M. Alvarado y C. Albano, «Degradación térmica de fibras de coco con tratamiento químico provenientes de mezclas de concreto (estudio cinético)», *Revista Ingeniería UC*, vol. 20, n° 2, pp. 60-67, 2013.
- [71] E. Njeugna, D. Ndapeu, S. Bistac, J. Drean, J. Ngenefeme Foba y M. Fogue, «Contribution to the characterisation of the coconut shells (coco nucifera) of Cameroon», *International Journal of Mechanics Structural*, vol. 4, n° 1, pp. 1-23, 2013.
- [72] M. Mohammed, R. Rahman, A. M. Mohammed, T. Adam, B. O. Betar, A. F. Osman y O. S. Dahham, «Surface treatment to improve water repellence and compatibility of natural fiber with polymer matrix: Recent advancement», *Polymer Testing*, pp. 1-76, 2022.
- [73] D. R. Askeland, P. P. Fulay y W. J. Wright, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, México: Cengage Learning, 2012.

- [74] A. M. Bazezew, S. A. Emire, M. T. Sisay y J. Kinyuru, «Extraction, phytochemical analysis, monosaccharide composition and functional properties of *X. americana* seed mucilage», *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, vol. 27, pp. 1-10, 2020.
- [75] G. Bulut, M. Chimeddorj, F. Esenli y M. Çelik, «Production of desiccants from Turkish bentonites», *Applied Clay Science*, vol. 49, pp. 141-147, 2009.
- [76] British Standard. (1997). «Acoustics Sound absorbers for use in buildings Rating of sound absorption», (*ISO 11654:1997*). <https://www.iso.org/standard/19583.html>

# **Anexos**

## A. Estudio de repetibilidad y reproducibilidad del tubo de impedancias

Para cada una de los compósitos que se prepararon 3 muestras idénticas las cuales se nombraron como M1, M2 y M3. En la Figura 51 se muestran los resultados de la caracterización acústica de las muestras de referencia, donde se observa que la respuesta acústica para cada uno de los coeficientes presentó una gran similitud a pesar de ser muestras diferentes, el registro de los datos se realizó 2 veces. Para generar las gráficas finales de los coeficientes acústicos, se calculó el promedio de los registros obtenidos para cada una de las muestras. Estas graficas demuestran que la metodología de síntesis empleada es reproducible.

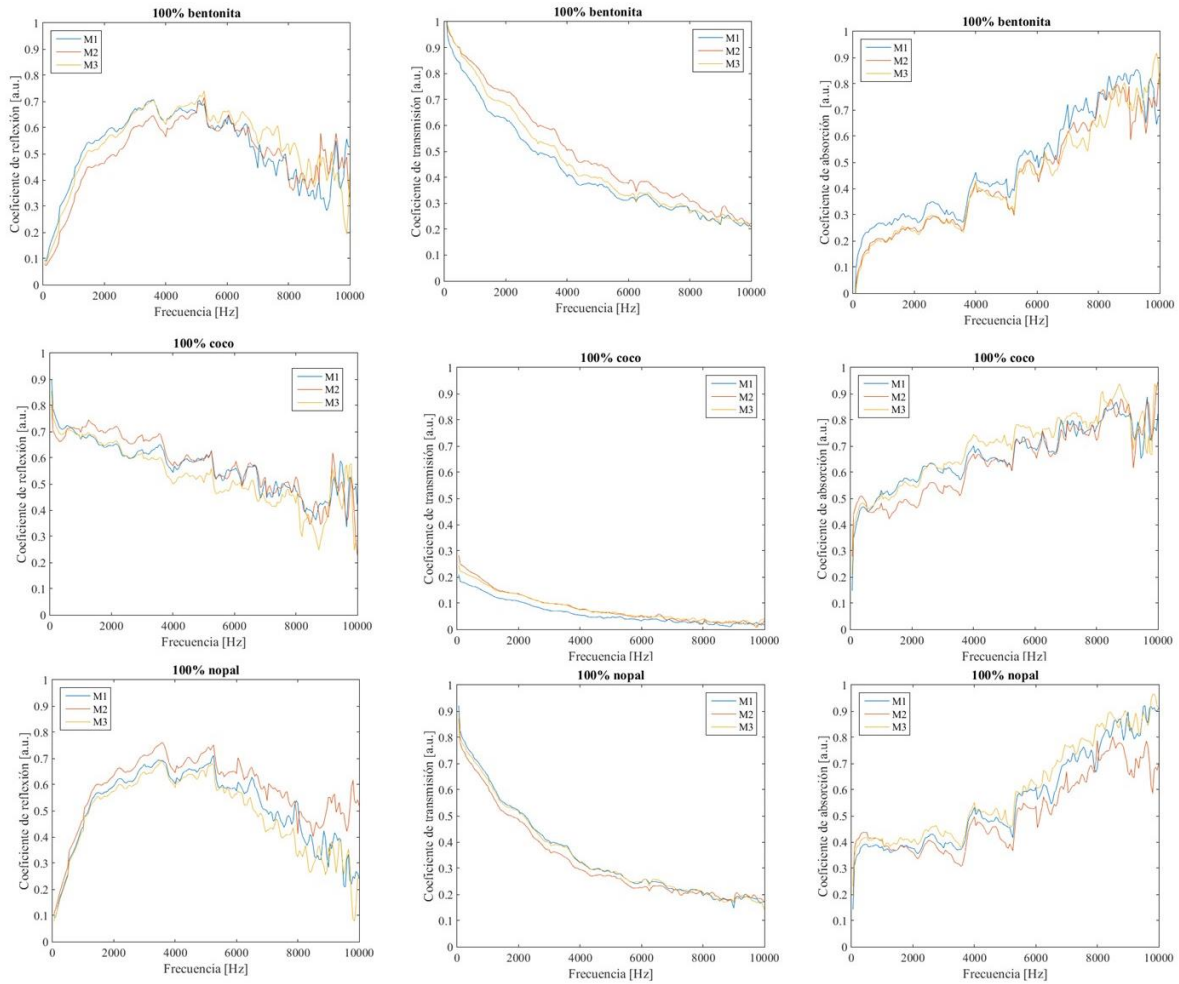


Figura 51 Coeficientes acústicos de a) la bentonita, b) fibra de coco y c) fibra de nopal.

## B. Análisis de humedad

Tabla 15. Aumento del peso de los compósitos al agregar gotas de agua en la superficie.

Composición	Gotas	Aumento (g)	Composición	Gotas	Aumento (g)
100 % nopal	0	0	100 % coco	0	0
	1	0.036		1	0.1
	2	0.045		2	0.049
	3	0.027		3	0.062
	4	0.023		4	0.041
75 % nopal	0	0	75 % coco	0	0
	1	0.03		1	0.051
	2	0.03		2	0.031
	3	0.027		3	0.065
	4	0.031		4	0.013
50 % nopal	0	0	50 % coco	0	0
	1	0.069		1	0.045
	2	0.027		2	0.038
	3	0.032		3	0.027
	4	0.033		4	0.037
25 % nopal	0	0	25 % coco	0	0
	1	0.021		1	0.05
	2	0.031		2	0.033
	3	0.029		3	0.041
	4	0.026		4	0.043
100 % bentonita	0	0			
	1	0.045			
	2	0.046			
	3	0.038			
	4	0.039			

De la Tabla 15 se obtuvo que en promedio cada una de las gotas tenía un peso de 0.0319 g, además que la cantidad de agua que se colocó a las muestras es muy similar.

### C. Coeficientes acústicos de las muestras húmedas

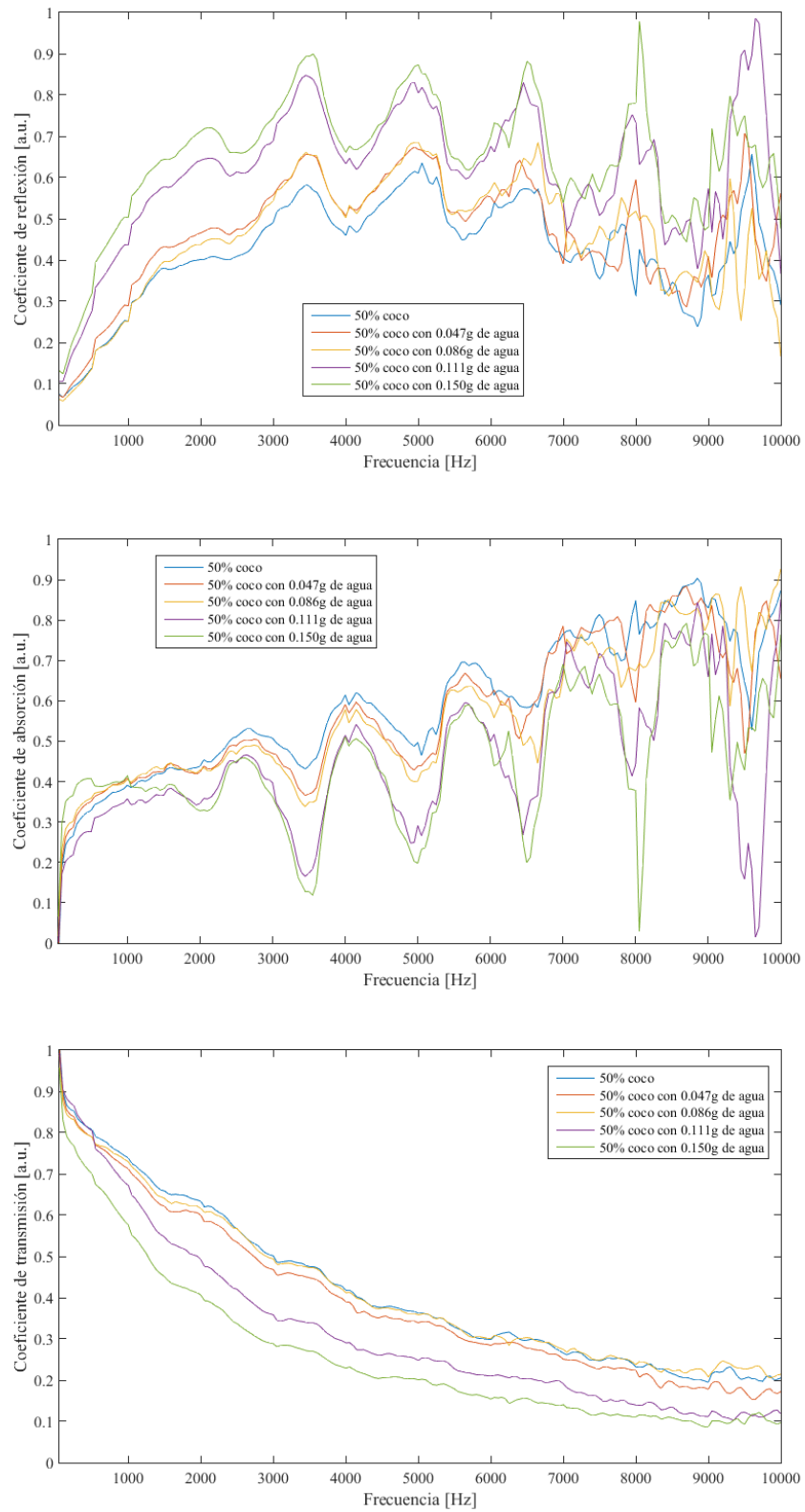


Figura 52. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión 50% fibra de coco y 50% bentonita al aumentar la humedad superficial.

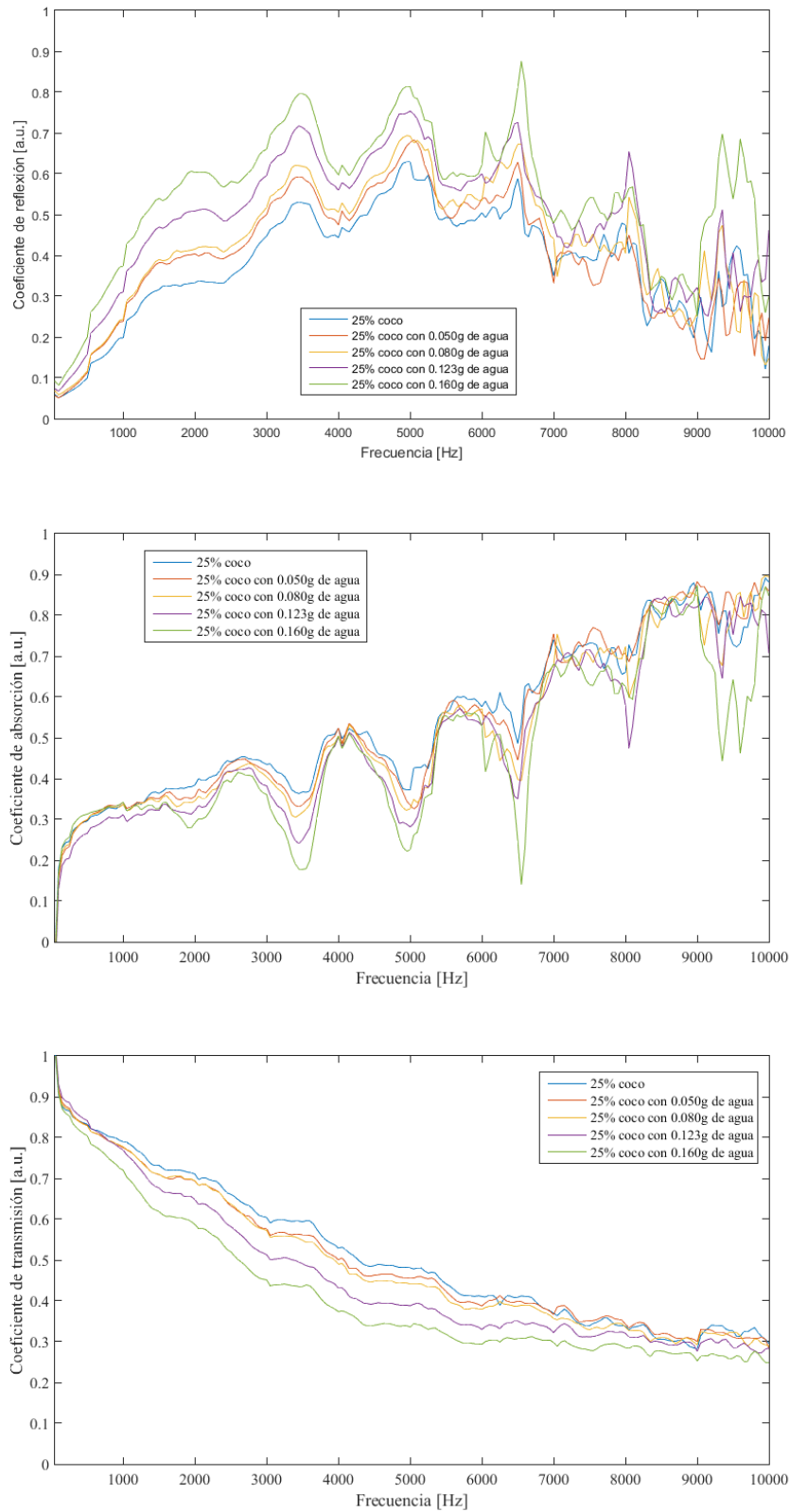


Figura 53. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión 25% fibra de coco y 75% bentonita al aumentar la humedad superficial.

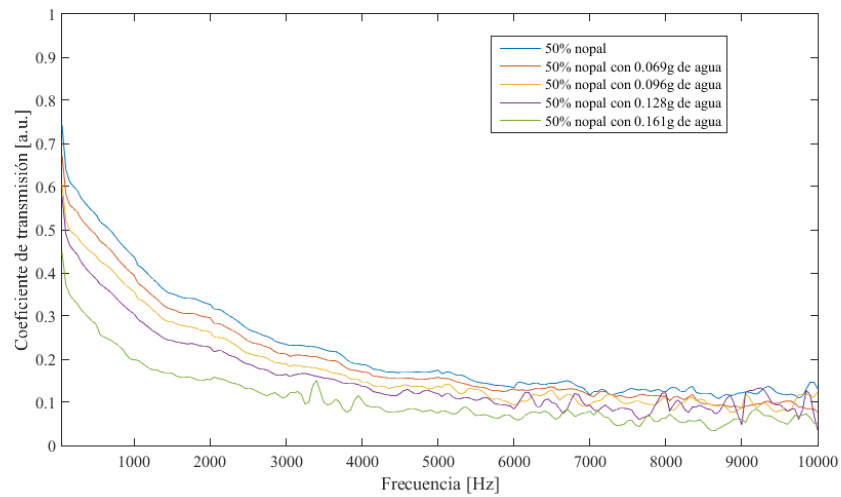
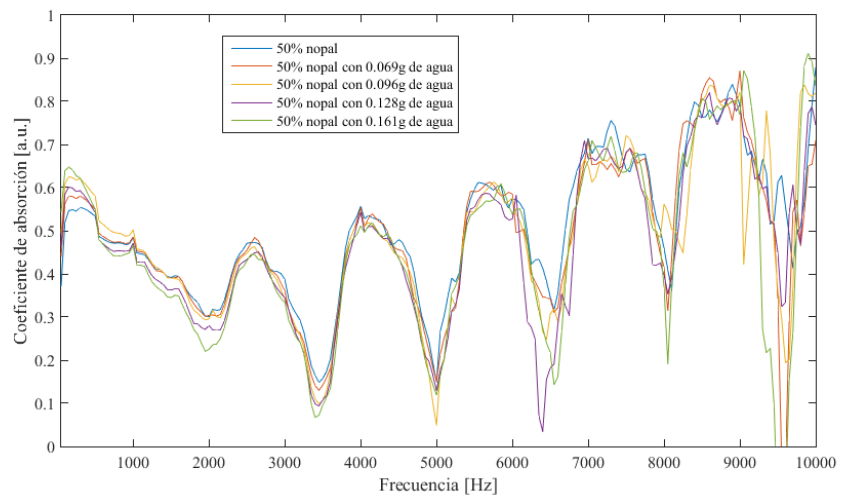
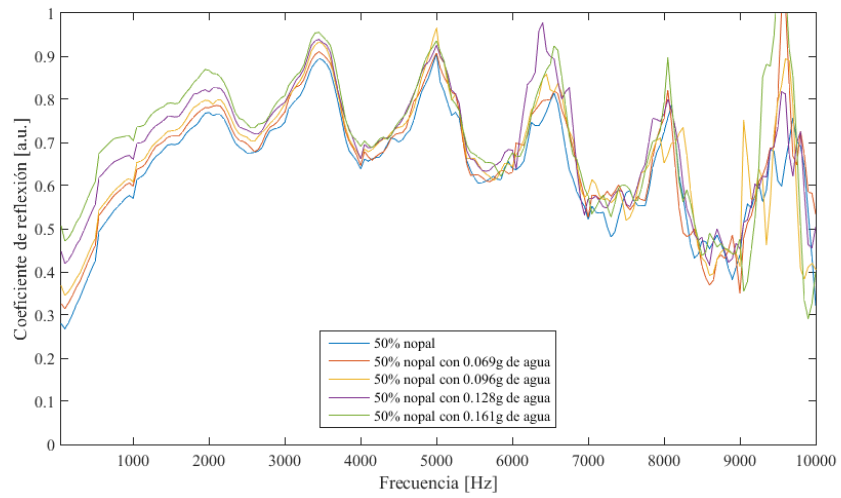


Figura 54. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión 50% fibra de nopal y 50% bentonita.

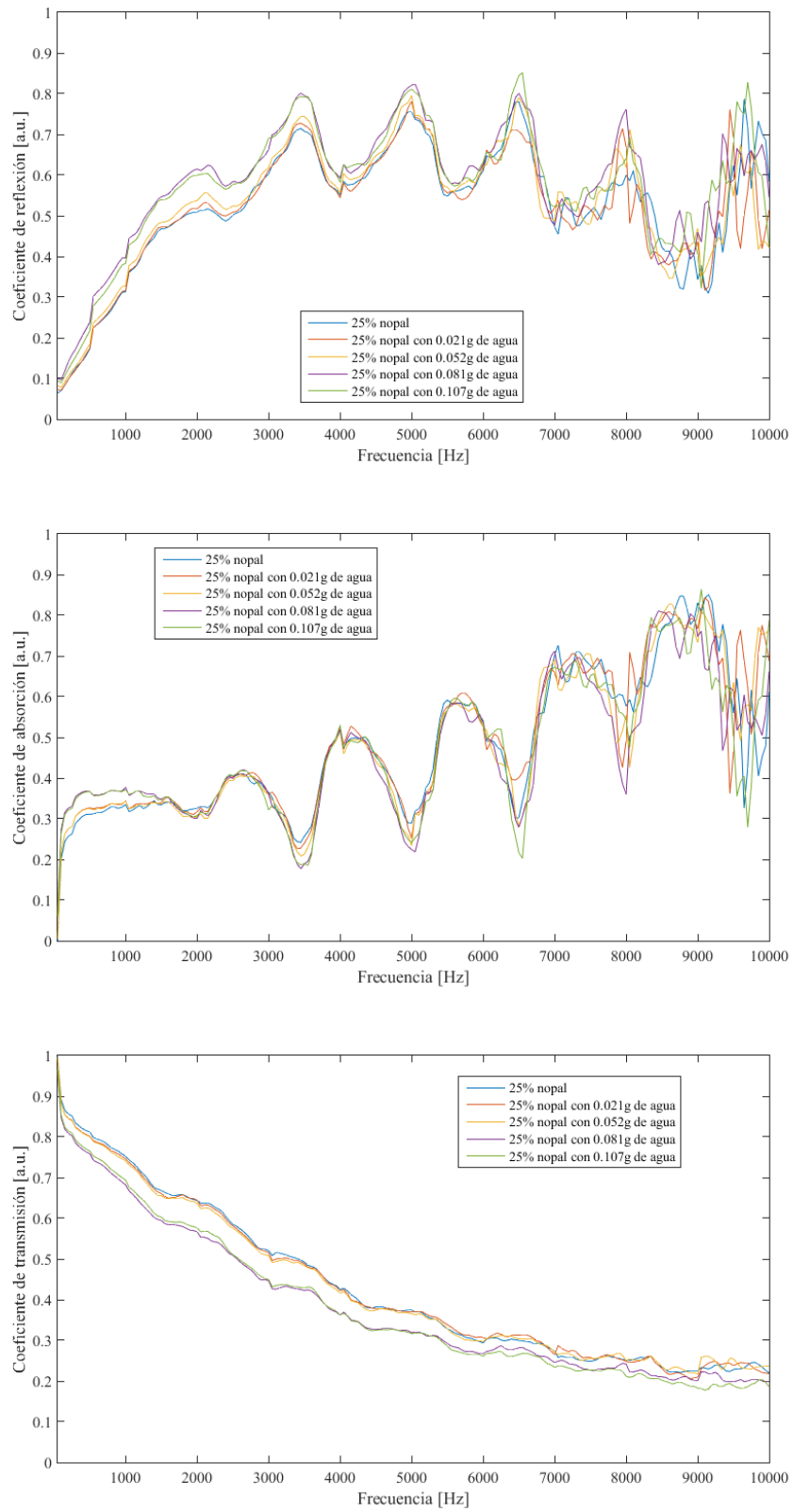


Figura 55. Coeficiente de a) reflexión, b) absorción y c) transmisión 25% fibra de nopal y 25% bentonita al aumentar la humedad superficial.

## D. Respuesta al impulso de los compósitos

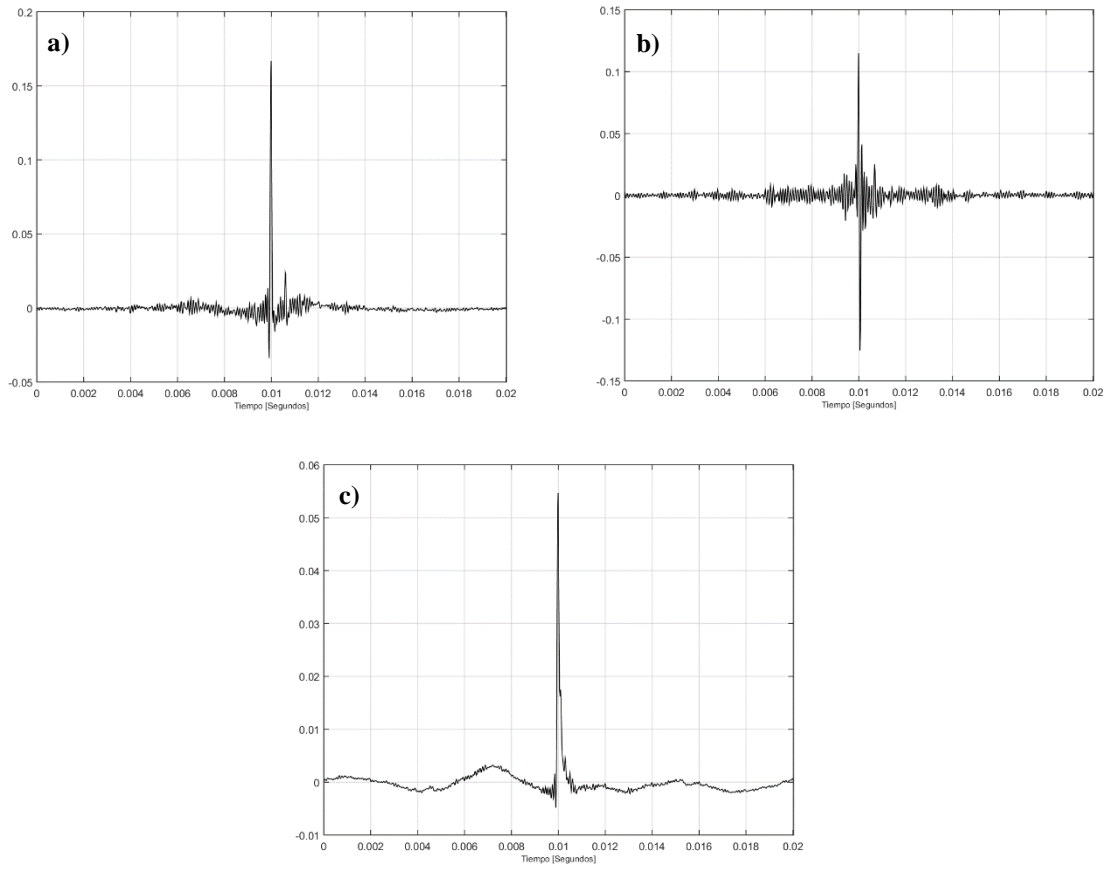
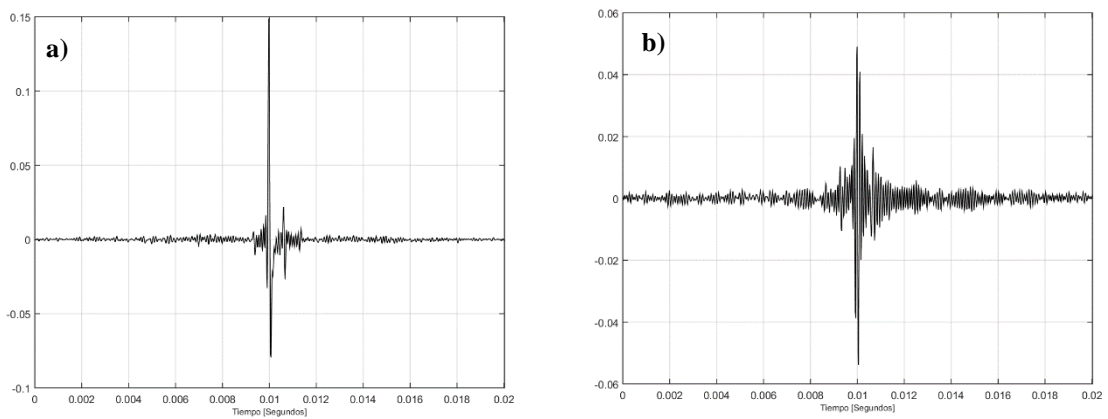


Figura 56. Respuesta al impulso de la fibra de coco a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.



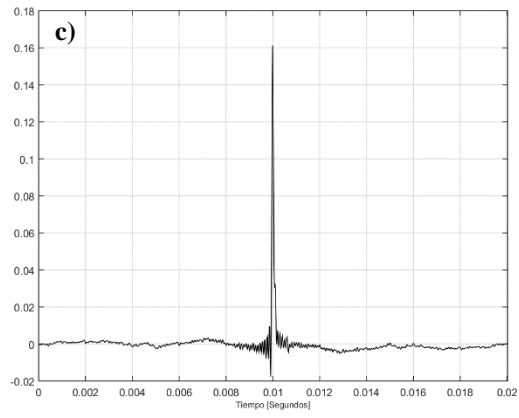


Figura 57. Respuesta al impulso del Compósito de 50% fibra de coco y 50% bentonita a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.

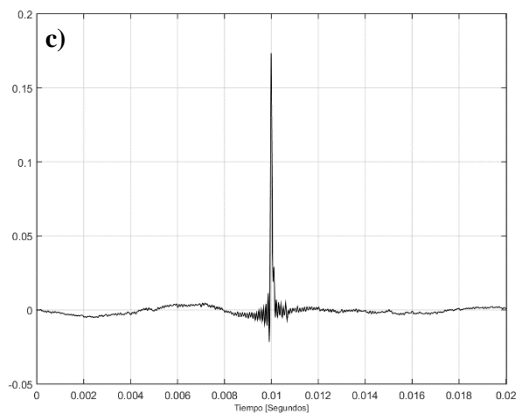
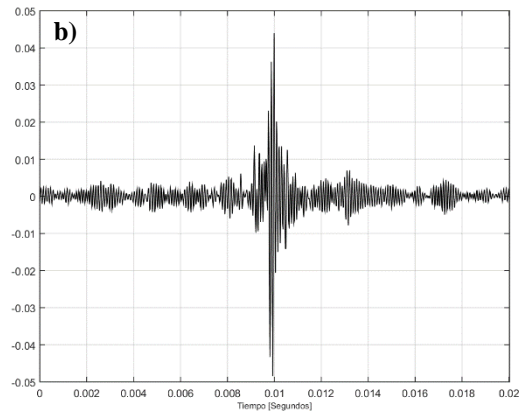
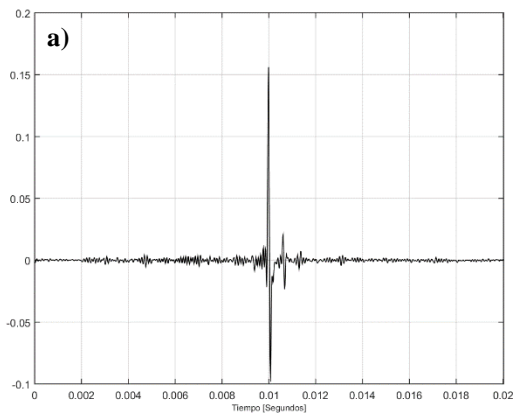


Figura 58. Respuesta al impulso del Compósito de 25% fibra de coco y 75% bentonita a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.

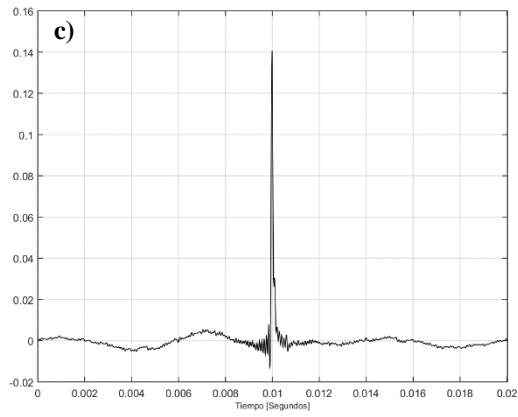
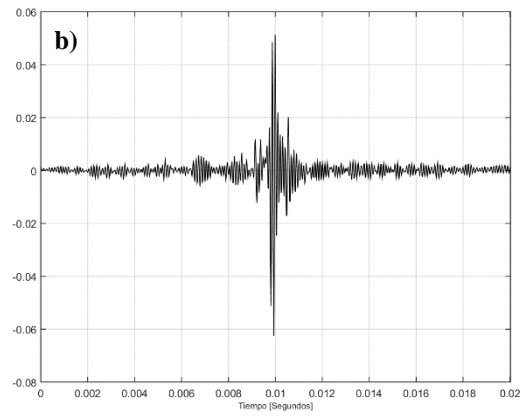
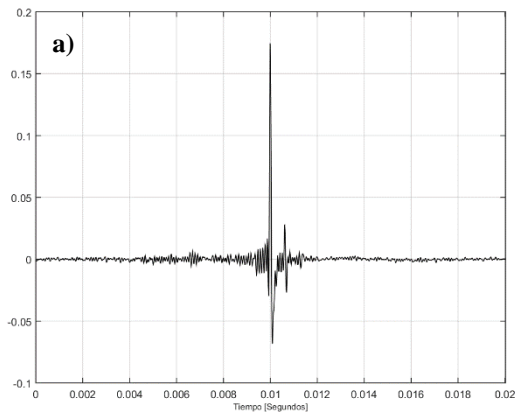
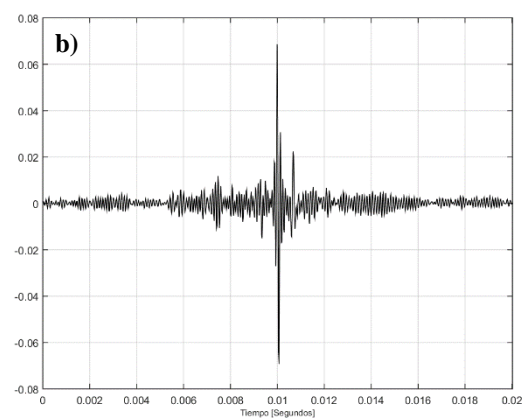
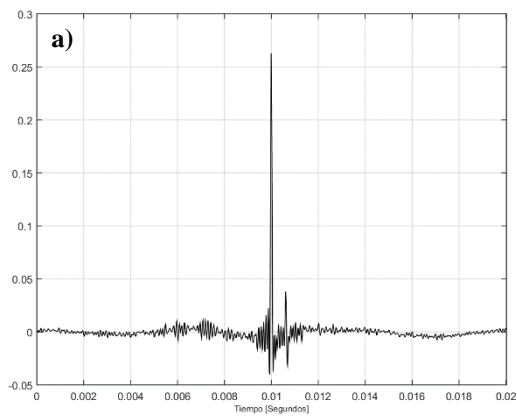


Figura 59. Respuesta al impulso de la fibra de nopal a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.



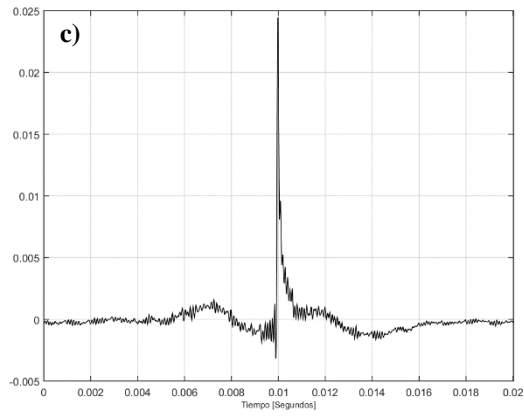


Figura 60. Respuesta al impulso del Compósito de 75% fibra de nopal y 25% bentonita a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.

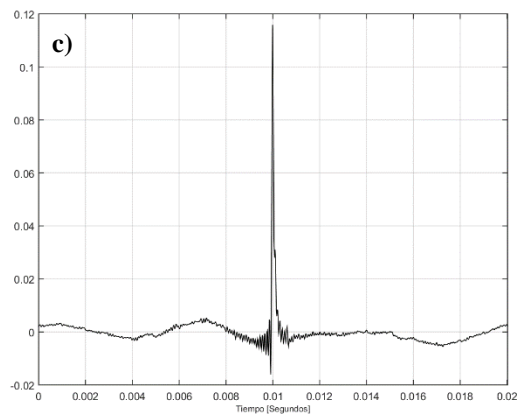
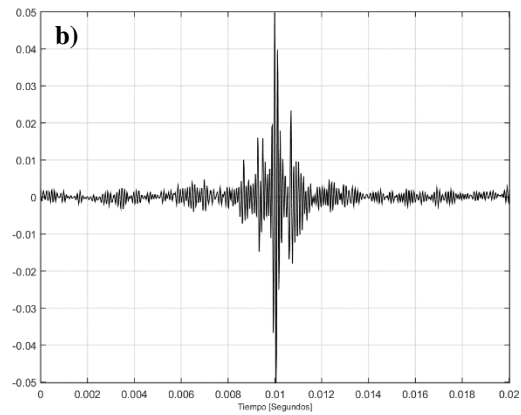
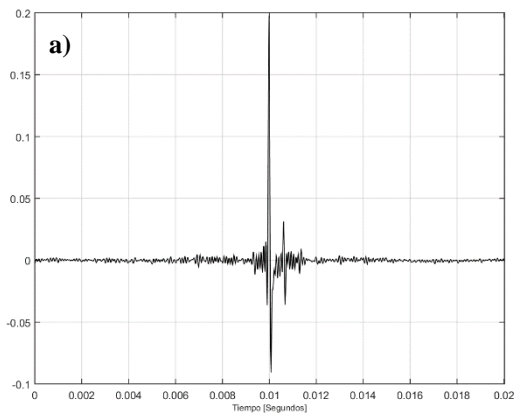


Figura 61. Respuesta al impulso del Compósito de 50% fibra de nopal y 50% bentonita a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.

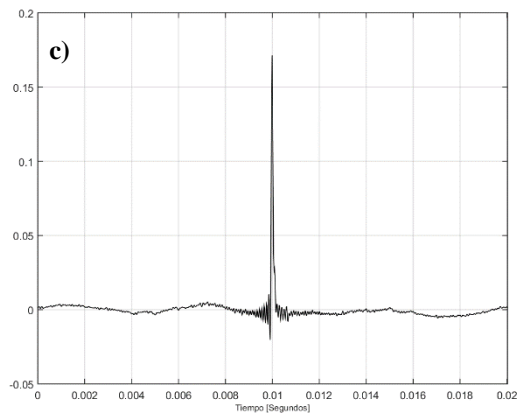
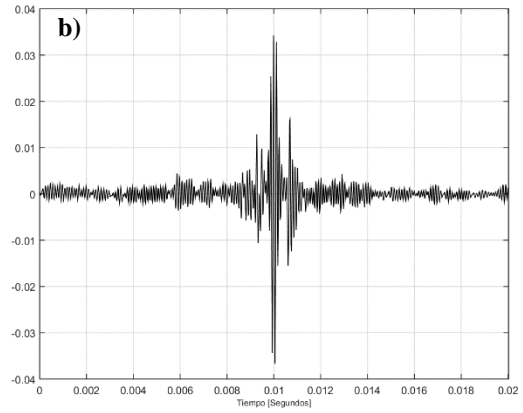
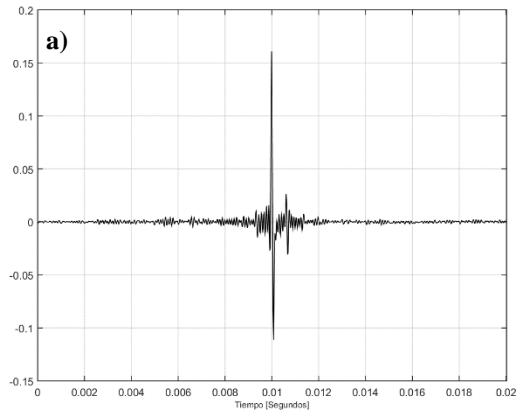
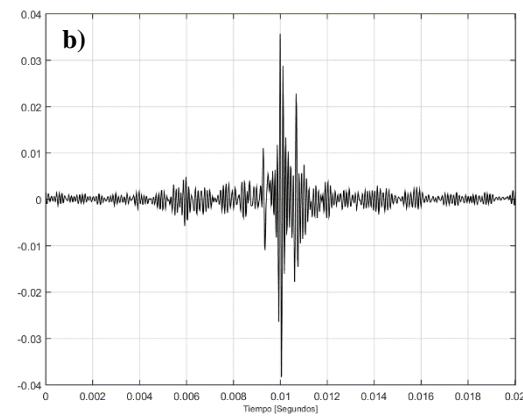
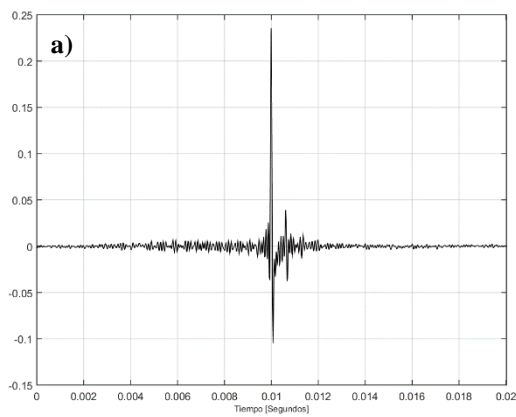
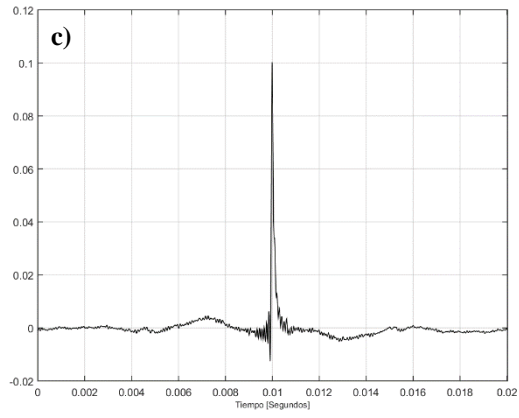


Figura 62. Respuesta al impulso del Compósito de 25% fibra de coco y 75% bentonita a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.





*Figura 63. Respuesta al impulso de bentonita a) reflexión, b) transmisión y c) absorción.*