



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN NANOCIENCIAS Y MATERIALES**

**“Análisis de la propagación de ondas acústicas  
en tallos cilíndricos de espinacas”**

Tesis que presenta

**América del Refugio Aguilera López**

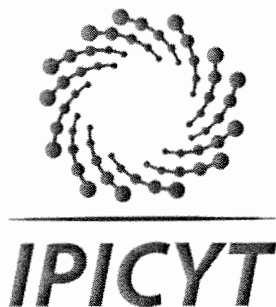
Para obtener el grado de

**Maestra en Nanociencias y Materiales**

Director de la Tesis:

**Dr. Braulio Gutiérrez Medina**

San Luis Potosí, S.L.P., julio de 2023



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**Análisis de la propagación de ondas acústicas en tallos cilíndricos de espinaca**” presentada para obtener el Grado de Maestra en Nanociencias y Materiales fue elaborada por **América del Refugio Aguilera López** y aprobada el **día 26 de junio de 2023** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Materiales Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. Braulio Gutiérrez Medina**  
Director de la tesis

---

**Dr. J. Sergio Casas Flores**  
Miembro del Comité Tutorial

---

**Dr. Haret-Codratian Rosu**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en el Laboratorio de Pinzas Ópticas de la División de Materiales Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. Braulio Gutiérrez Medina.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (1151358) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.

## Acta de examen

# Agradecimientos

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT) por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto en sus instalaciones, así como a los miembros de esta comunidad por su contribución, consejo y lo aprendido durante mi estancia en el instituto.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo financiero otorgado a través de la beca brindada, la cual ha sido crucial para mi formación académica y el avance de mi proyecto.

Al Dr. Braulio Gutiérrez Medina por su orientación como mi asesor de tesis, así como por su enseñanza, paciencia, disponibilidad y guía a lo largo de este proyecto.

A los miembros del comité tutorial, el Dr. J. Sergio Casas Flores y el Dr. Haret-Codratián Rosu por el tiempo dedicado a la evaluación y revisión de este proyecto; así como por su contribución, disponibilidad y sus valiosos comentarios durante el desarrollo de esta tesis.

# Contenido

<b>Constancia de aprobación de la tesis</b>	ii
<b>Créditos Institucionales</b>	iii
<b>Acta de examen</b>	iv
<b>Agradecimientos</b>	v
<b>Lista de tablas</b>	vii
<b>Lista de Figuras</b>	viii
<b>Anexos</b>	x
<b>Resumen</b>	3
<b>Abstract</b>	4
<b>1. Introducción</b>	5
<b>2. Antecedentes</b>	7
<b>3. Planteamiento del Problema</b>	18
<b>3.1. Justificación</b>	18
<b>3.2. Hipótesis</b>	19
<b>3.3. Objetivo general</b>	19
<b>3.4. Objetivos particulares</b>	19
<b>4. Metodología.</b>	20
<b>5. Resultados.</b>	40
<b>6. Conclusiones</b>	72
<b>7. Perspectivas</b>	74
<b>8. Referencias</b>	75

## Lista de tablas

1. Longitud de los 3 tubos metálicos utilizados y la frecuencia fundamental esperada para cada uno de éstos.	45
2. Longitud de los tallos utilizados y frecuencia fundamental esperada para cada uno de éstos.	50
3. Condiciones de temperatura y humedad al momento de realizar las respectivas mediciones.	57
4. Condiciones de temperatura y humedad al realizar la toma de imágenes	71

## Lista de Figuras

<b>Ilustración 1. Rango de frecuencias acústicas emitidas y audibles para algunos mamíferos. Ilustración tomada de <a href="http://theory.labster.com">theory.labster.com</a></b>	<b>8</b>
<b>Ilustración 2. Estimulación mecánica en plantas del tipo Bryonia Dioica, la planta de la izquierda representa la planta control, mientras que la de la derecha corresponde a la planta estimulada de forma táctil. Ilustración tomada de la referencia (Jaffe, 1973).</b>	<b>10</b>
<b>Ilustración 3. Cámara acústica utilizada, la cual consiste en un contenedor cilíndrico forrado de espuma acústica, en el interior de este se colocó arena y un contenedor con un altavoz, en suspensión se colocó un recipiente plástico con 3 cajas Petri, las cuales contienen semillas de okra, zucchini y ambas. Ilustración tomada de la referencia (Katherine Creath, 2004).</b>	<b>12</b>
<b>Ilustración 4. Metodología utilizada para determinar los efectos de las vibraciones en plantas de A. thaliana, el cual consiste en un generador de vibración sinusoidal, que a su vez está compuesto de un oscilador de baja frecuencia, un amplificador y un altavoz.</b>	<b>14</b>
<b>Ilustración 5. Representación de un movimiento oscilatorio, el cual es generado por la unión de una masa y un resorte al desplazar ésta una cierta distancia. Tomado de (Kuttrutt, 2007)</b>	<b>21</b>
<b>Ilustración 6. Representación esquemática de un tubo cilíndrico de longitud L. Ilustración tomada de (Tohyama, 2020)</b>	<b>23</b>
<b>Ilustración 7. Representación esquemática de la definición de Hertz. Ilustración tomada de <a href="https://compuycom.com.ar/Libro/frecuencia.gif">https://compuycom.com.ar/Libro/frecuencia.gif</a></b>	<b>26</b>
<b>Ilustración 8. Representación esquemática de la propagación de una onda por medio de un altavoz. Ilustración Tomada de <a href="https://www.ingenierizando.com/cinematica/onda-sonora-onda-de-sonido/">https://www.ingenierizando.com/cinematica/onda-sonora-onda-de-sonido/</a></b>	<b>28</b>
<b>Ilustración 9. Esquema general de los pasos a seguir para desarrollar de forma correcta una metodología que permita conocer los valores de resonancia, frecuencia fundamental y armónicos de tubos y tallos de espinaca.</b>	<b>29</b>
<b>Ilustración 10. Resonador de Helmholtz. Ilustración tomada de <a href="https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html">https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html</a></b>	<b>32</b>
<b>Ilustración 11. Ejemplo de espectro de potencia de una señal transmitida en los tallos de espinaca o tubos cilíndricos.</b>	<b>35</b>
<b>Ilustración 12. Determinación y localización en Mathematica del valor máximo de la señal transmitida en el espectro de potencia, la cual corresponde al pico representado en la ilustración, la línea roja corresponde a la altura de este.</b>	<b>36</b>
<b>Ilustración 13. Gráfico de la respuesta de un tubo metálico al someterlo a estímulos acústicos, es decir, potencia acústica transmitida como función de las frecuencias</b>	<b>37</b>
<b>Ilustración 14. Montaje experimental para determinar la respuesta natural de la fuente de recepción (micrófono) utilizada, ambos se encuentran en suspensión.</b>	<b>41</b>
<b>Ilustración 15. Respuesta natural del micrófono, uso de auricular como fuente de emisión</b>	<b>41</b>
<b>Ilustración 16. Respuesta natural del micrófono dada por el fabricante. Ilustración tomada de <a href="https://www.behringer.com/product.html?modelCode=P0118">https://www.behringer.com/product.html?modelCode=P0118</a></b>	<b>42</b>
<b>Ilustración 17. Respuesta natural del micrófono al tener como fuente de emisión la bocina integrada en la computadora.</b>	<b>43</b>
<b>Ilustración 18. Montaje experimental para determinar la potencia acústica transmitida de tubos metálicos como validación a la metodología propuesta.</b>	<b>44</b>
<b>Ilustración 19. Gráfico de la respuesta acústica del tubo pequeño, las líneas horizontales representan la frecuencia a la cual se espera que aparezcan sus armónicos, siendo la primera línea la frecuencia fundamental, cuyo valor es 1270 Hz.</b>	<b>46</b>



<b>Ilustración 20. Gráfico de la respuesta acústica del tubo mediano, las líneas horizontales representan la frecuencia a la cual se espera que aparezcan sus armónicos, siendo la primera línea la frecuencia fundamental, cuyo valor es 893 Hz.</b>	<b>47</b>
<b>Ilustración 21. Gráfico de la respuesta acústica del tubo grande, las líneas horizontales representan la frecuencia a la cual se espera que aparezcan sus armónicos, siendo la primera línea la frecuencia fundamental, cuyo valor es 633 Hz.</b>	<b>48</b>
<b>Ilustración 22. Montaje experimental.</b>	<b>49</b>
<b>Ilustración 23. Vista del arreglo realizado al interior de la caja de aislamiento acústico.</b>	<b>49</b>
<b>Ilustración 24. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 1 es de 978 Hz</b>	<b>51</b>
<b>Ilustración 25. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 2 es de 1083 Hz.</b>	<b>51</b>
<b>Ilustración 26. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 3 es de 1248 Hz</b>	<b>52</b>
<b>Ilustración 27. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 4 es de 1276 Hz</b>	<b>53</b>
<b>Ilustración 28. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 5 es de 84 Hz</b>	<b>53</b>
<b>Ilustración 29. Respuesta acústica de tallos cilíndricos de espinaca.</b>	<b>54</b>
<b>Ilustración 30. Respuesta acústica de tallos de cebollín</b>	<b>55</b>
<b>Ilustración 31. Respuesta acústica de apio.</b>	<b>55</b>
<b>Ilustración 32. Respuesta acústica del tallo alfa.</b>	<b>58</b>
<b>Ilustración 33. Respuesta acústica del tallo beta.</b>	<b>58</b>
<b>Ilustración 34. Respuesta acústica del tallo gamma.</b>	<b>59</b>
<b>Ilustración 35. Respuesta acústica del tallo delta.</b>	<b>60</b>
<b>Ilustración 36. Respuesta acústica del tallo épsilon.</b>	<b>60</b>
<b>Ilustración 37. Respuesta acústica del tallo zeta.</b>	<b>61</b>
<b>Ilustración 38. Respuesta acústica del tallo eta.</b>	<b>61</b>
<b>Ilustración 39. Respuesta acústica del tallo theta.</b>	<b>62</b>
<b>Ilustración 40. Respuesta acústica del tallo iota.</b>	<b>63</b>
<b>Ilustración 41. Respuesta acústica del tallo kappa.</b>	<b>63</b>
<b>Ilustración 42. Respuesta acústica del tallo lambda.</b>	<b>64</b>
<b>Ilustración 43. Respuesta acústica del tallo mu.</b>	<b>64</b>
<b>Ilustración 44. Respuesta acústica del tallo nu.</b>	<b>65</b>
<b>Ilustración 45. Respuesta acústica del tallo xi.</b>	<b>65</b>
<b>Ilustración 46. Respuesta acústica del tallo ómicron.</b>	<b>66</b>
<b>Ilustración 47. Diagrama que representa la diferencia entre el arreglo óptico de un microscopio compuesto y un microscopio de disección o estereoscópico. Tomada de <a href="https://www.microscopemaster.com/">https://www.microscopemaster.com/</a></b>	<b>68</b>
<b>Ilustración 48. Imagen tomada por microscopía estereoscópica de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas</b>	<b>69</b>
<b>Ilustración 49. Imagen tomada por microscopía estereoscópica de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas dos horas después</b>	<b>70</b>
<b>Ilustración 50. Imagen tomada por microscopía estereoscópica de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas 4 horas después</b>	<b>71</b>

# Anexos

## Anexo 1. Código en *Mathematica*

1. Importación de 100 archivos generados por LabVIEW y periodograma de éstos

```
Datos = Table[
```

```
  Import["C:\\Users\\América\\Dropbox\\PC\\Downloads\\ArchivosLabview\\ArchivosLabView_" <> ToString[i] <> ".lvm",  
  "Data"], {i, 35087, 35186}];
```

```
i = 0;
```

```
For[j = 1, j < 101, j++,
```

```
  Print[ ListLinePlot[
```

```
    FindPeaks[10 Log[10, PeriodogramArray[Datos[[j, All, 2]]]], 0.1,
```

```
    Automatic, Automatic],
```

```
    PlotRange -> {{0, Length[Datos[[j, All, 2]]]/2}, All}]]]
```

2. Localización de máximo, creación de gráfico de potencia acústica transmitida

```
FR=Array[f,{100,2}];
```

```
For[j=1; wr=1,j<101,j++;wr=wr+10, Print[ Pick[FindPeaks[10  
Log[10,PeriodogramArray[Datos[[j, All, 2]]]], Automatic,  
4,Automatic],Thread[FindPeaks[10 Log[10,PeriodogramArray[Datos[[j, All,  
2]]]], Automatic, 4,Automatic][[All,1]]>wr]]]
```

```
For[j=1;wr=1,j<101,j++;wr=wr+10, FR[[j]]=Pick[FindPeaks[10  
Log[10,PeriodogramArray[Datos[[j, All, 2]]]], Automatic,  
4,Automatic],Thread[FindPeaks[10 Log[10,PeriodogramArray[Datos[[j, All,  
2]]]], Automatic, 4,Automatic][[All,1]]> wr]][[1]]]
```

```
FR
```

```
For[j=1 ,j<101,j++, FR[[j,1]] = (FR[[j,1]]-1)*20]
```

```
FR
```

```
MeanVector = Array[f,100]
```

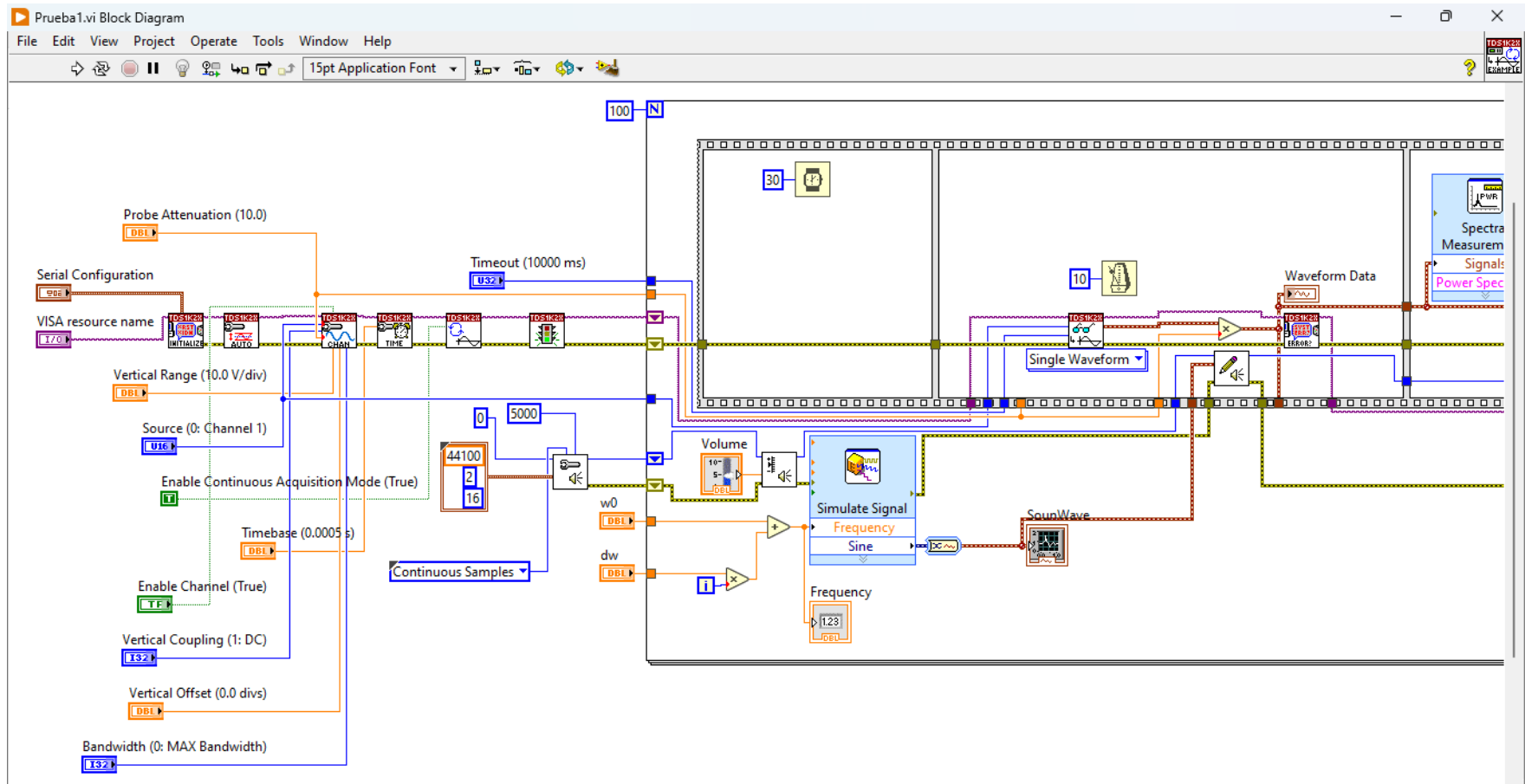
```
MeanVector[[1]]=Mean[Drop[10 Log[10,PeriodogramArray[Datos[[1, All,  
2]]]][[1;;1250]],{1,10}]]
```

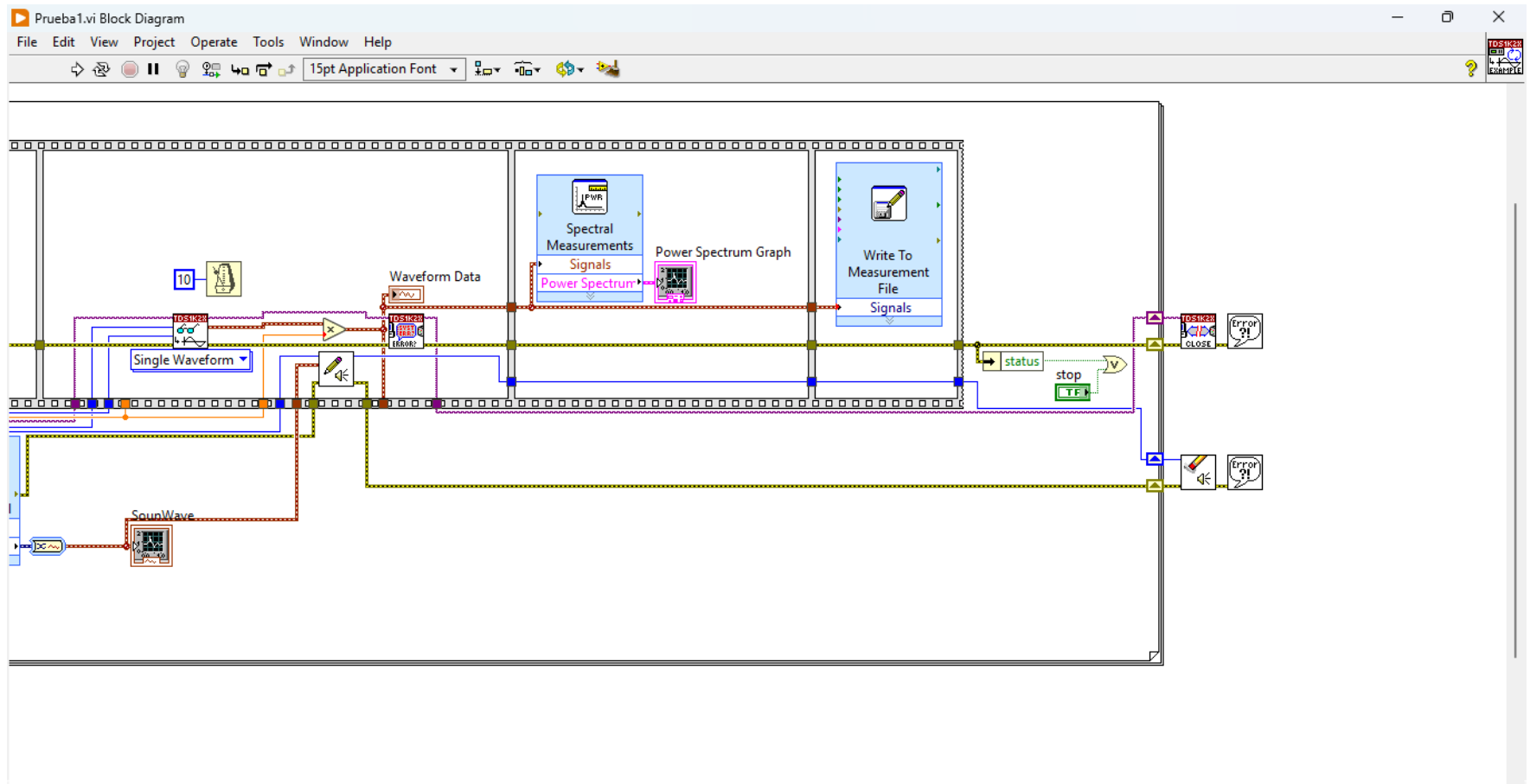
```
For[j=2;wr=10,j<101,j++;wr=wr+10,  
MeanVector [[j]]=Mean[Drop[10 Log[10,PeriodogramArray[Datos[[j, All,  
2]]]][[1;;1250]],{wr,wr+20}]]  
]
```

```
For[j=1,j<101,j++,  
FR[[j,2]] = FR[[j,2]]-MeanVector[[j]]]
```

```
ListLinePlot[FR, PlotRange->{{1,16000},All}]
```

## Anexo 2. Código en LabVIEW





## Configuración de “Simulate signal”

Configure Simulate Signal [Simulate Signal]

**Signal**

Signal type  
Sine

Frequency (Hz)  
10.1

Phase (deg)  
0

Amplitude  
1

Offset  
0

Duty cycle (%)  
50

Add noise

Noise type  
Uniform White Noise

Noise amplitude  
0.6

Seed number  
-1

Trials  
1

**Timing**

Samples per second (Hz)  
44100

Simulate acquisition timing

Number of samples  
100000

Run as fast as possible

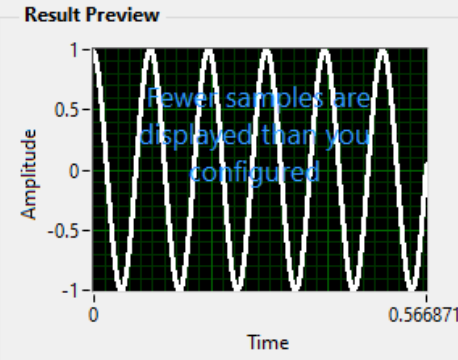
Automatic

Integer number of cycles

Actual number of samples  
100000

Actual frequency  
10.1

**Result Preview**



**Time Stamps**

Relative to start of measurement

Absolute (date and time)

**Reset Signal**

Reset phase, seed, and time stamps

Use continuous generation

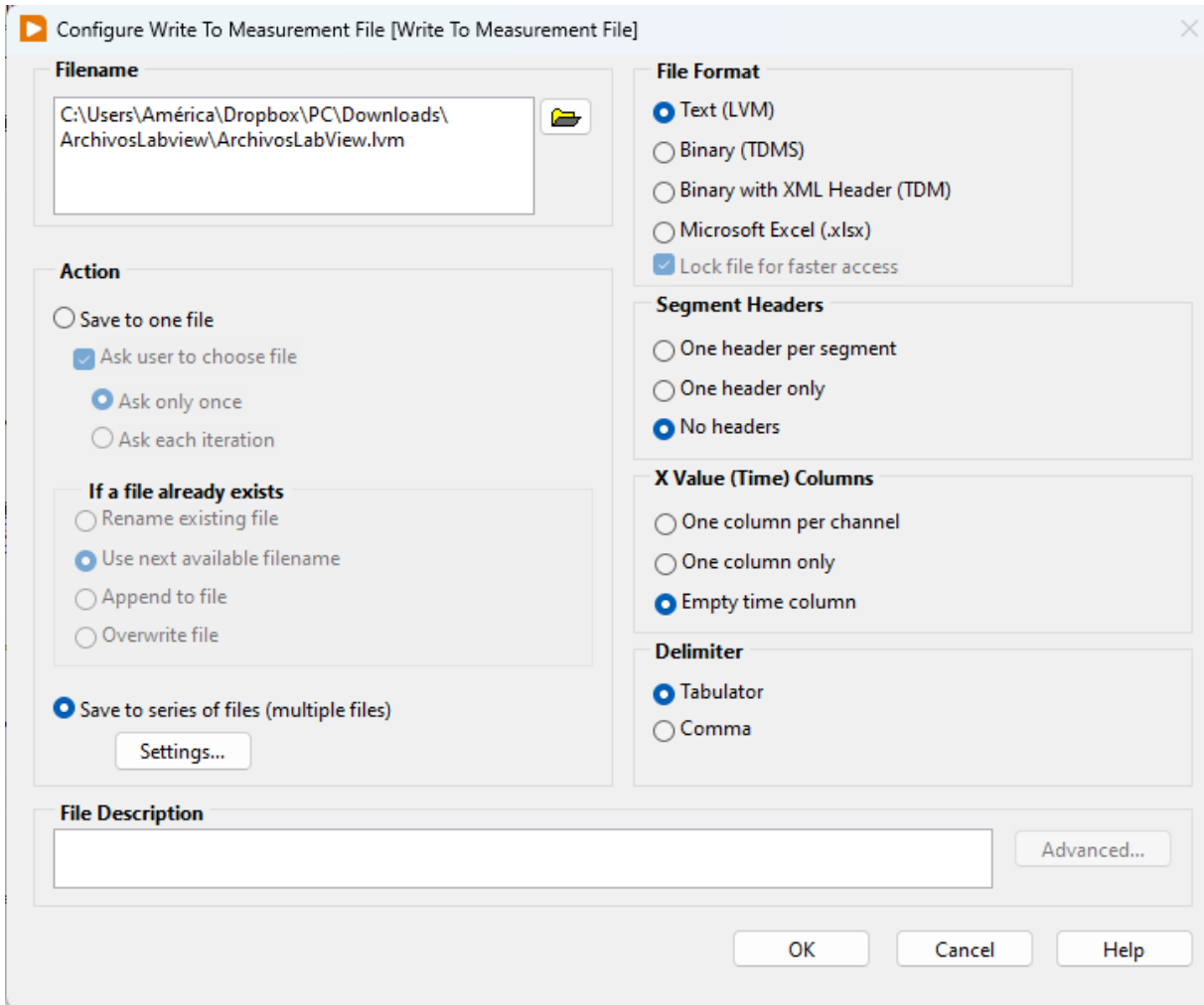
**Signal Name**

Use signal type name

Signal name  
Sine

OK Cancel Help

## Configuración de “Write to measurement file”



## **Resumen**

El presente trabajo de tesis se enfocó en el desarrollo de un método teórico-experimental para determinar las propiedades acústicas de tallos de espinaca. Se usó un modelo teórico donde las espinacas fueron tomadas como tubos cilíndricos. Además, se desarrolló un montaje experimental, en donde se aplicaron ondas acústicas de diferentes frecuencias (de 200 a 20000 Hz) por un extremo del tallo y por el otro extremo se midió la intensidad de las ondas propagadas con un micrófono. La obtención automatizada y el procesado de las señales se llevó a cabo con los *softwares LabVIEW y Mathematica*, respectivamente.

Para validar el método, se llevaron a cabo mediciones de las frecuencias de resonancia, la frecuencia fundamental y los armónicos presentes en tres tubos metálicos con diferentes longitudes y el mismo diámetro (1 cm). Los valores obtenidos experimentalmente para la curva de potencia acústica transmitida de los tubos metálicos coincidieron con los cálculos teóricos de las frecuencias de resonancia acústica.

Adicionalmente, se pudo obtener la curva de potencia acústica transmitida de los tallos de espinaca, cumpliendo así con el objetivo principal de esta investigación. Se demostró que los tallos de espinaca tienen un comportamiento acústico similar al de los tubos cilíndricos, ya que los valores teóricos y experimentales de las frecuencias de resonancia, (frecuencia fundamental y armónicos) concuerdan.

Finalmente, se obtuvieron imágenes por microscopía estereoscópica para examinar la morfología de los tallos de espinaca durante periodos de tiempo. Estos resultados proporcionan información adicional sobre la estructura de los tallos y su posible relación con las propiedades acústicas observadas.



## Abstract

The present thesis focused on the development of a theoretical-experimental method to determine the acoustic properties of spinach stems. A theoretical model was used, considering the spinach stems as cylindrical tubes. Additionally, an experimental setup was developed, where acoustic waves of different frequencies (ranging from 200 to 20,000 Hz) were applied to one end of the stem, and the intensity of the propagated waves was measured at the other end using a microphone. Automated signal acquisition and processing were performed using LabVIEW and Mathematica software, respectively.

To validate the method, measurements were conducted on the resonance frequencies, fundamental frequency, and harmonics present in three metallic tubes with different lengths but the same diameter (1 cm). The experimentally obtained values for the transmitted acoustic power curve of the metallic tubes matched the theoretical calculations of the acoustic resonance frequencies.

Furthermore, the transmitted acoustic power curve of the spinach stems was successfully obtained, fulfilling the main objective of this research. It was demonstrated that spinach stems exhibit similar acoustic behavior to cylindrical tubes, as the theoretical and experimental values of resonance frequencies (fundamental frequency and harmonics) coincide.

Finally, stereoscopic microscopy images were obtained to examine the morphology of the spinach stems over time. These results provide additional information about the structure of the stems and their possible relationship with the observed acoustic properties.

# 1. Introducción

Se denomina tigmomorfogénesis al cambio en el crecimiento o desarrollo de las plantas en respuesta a una estimulación mecánica (Jaffe, 1973). Podemos denominar este tipo de estímulos como contacto no dañino, viento, vibración, etc.

Aunque actualmente existe información acerca de pruebas realizadas respecto a la estimulación acústica en plantas, ya sea en la promoción de la germinación de semillas, para determinar cambios morfológicos en éstas, etc. se conoce muy poco sobre el rango de frecuencias en el que las plantas transmiten o reciben señales acústicas.

Se especula que la forma en que responden a frecuencias muy específicas es debido al impacto ecológico que esta tiene en su entorno, *“The plants also discriminated between the vibrations caused by chewing and those caused by wind or insect song. Plants thus respond to herbivore-generated vibrations in a selective and ecologically meaningful way.”* (H. M. Appel, 2014).

El propósito general de este proyecto es acercarnos a comprender cómo se da la propagación acústica en las plantas explorando una parte muy específica y poco estudiada de éstas, el tallo. Para lograrlo se propone un método experimental en el cual se modela a los tallos como tubos cilíndricos, lo cual permite un acercamiento al mejor entendimiento de este sistema, además de que el tallo es una parte fundamental de las plantas.

En el presente trabajo se plantea determinar cómo es la propagación de ondas acústicas a través de tallos de espinacas (de forma cilíndrica y hueca) determinando la potencia acústica transmitida de estas señales y consecuentemente comparando los resultados obtenidos para valores de frecuencias de resonancia con los encontrados en la literatura para tubos cilíndricos, por medio del desarrollo de dos rutinas en diferentes softwares: *LabVIEW* y *Mathematica*.

Finalmente, con ayuda de microscopía estereoscópica se observó la estructura y morfología de estos tallos, esto como información complementaria para comprender mejor el comportamiento acústico de los tallos de las plantas de espinaca.

## 2. Antecedentes

En la siguiente sección presentamos el rango de frecuencias acústicas audibles en algunos mamíferos para hacer hincapié en lo poco que se ha estudiado o se conoce sobre el rango de frecuencias acústicas que tiene algún impacto ya sea positivo o negativo en el desarrollo de las plantas o específicamente en alguna parte de ésta, i.e. la flor, las hojas, la raíz, etc. Por ello, la importancia de su estudio.

Posteriormente hablaremos de algunos ejemplos encontrados referentes a propagación de estímulos mecánicos en plantas para finalmente cerrar el capítulo delimitando nuestro campo de estudio, que es la propagación acústica a través de tallos de espinaca.

## 2.1 Rango de frecuencia acústica en algunos mamíferos

La comunicación es una base fundamental en el desarrollo de los seres vivos, ya que por medio de esta podemos entendernos, transmitir alguna idea, o en el caso de animales y plantas, enviar alguna señal de alerta a los otros miembros de su comunidad o ecosistema ante la presencia de algún tipo de estímulo externo, ya sea que éste sea derivado de algún tipo de depredador, algún fenómeno natural, etc.

Actualmente ya está bien identificado el rango de frecuencias acústicas en el cual se emiten o reciben señales acústicas en el reino animal. Por otra parte, aunque hay bastante evidencia de los cambios que se presentan en algunas plantas, ya sea en su desarrollo, morfología, germinación, etc. al someterlas a estímulos acústicos, se sabe muy poco sobre la respuesta acústica de las plantas, es decir, en qué rango de frecuencias emiten o reciben señales acústicas, y además qué rango tiene algún impacto en este reino.

Por lo tanto, en esta sección nos enfocaremos en enfatizar este punto, es decir, cuál es la respuesta de las plantas al someterse a diferentes estímulos acústicos

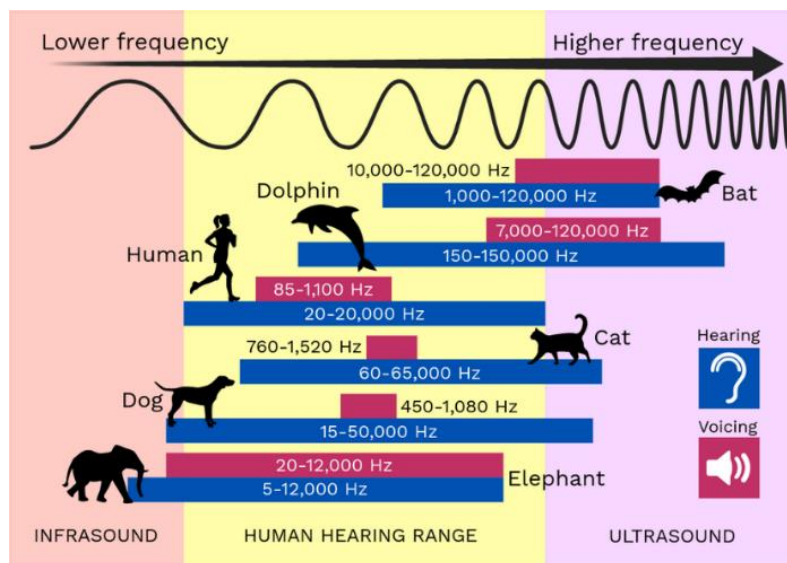


Ilustración 1. Rango de frecuencias acústicas emitidas y audibles para algunos mamíferos. Ilustración tomada de [theory.labster.com](http://theory.labster.com)

## **2.2. Estímulos mecánicos en plantas**

Específicamente vamos a enfocarnos en dos tipos principales de estímulos mecánicos, los cuales son los estímulos táctiles y acústicos.

### **2.2.1. Estímulos táctiles**

Los autores Jaffe et al. (Jaffe, 1973) obtuvieron las primeras pruebas referentes al impacto que tiene la estimulación mecánica en las plantas al observar cambios en su desarrollo y crecimiento. Las pruebas que dieron origen al término de tigmomorfogénesis fueron las relacionadas con los estímulos táctiles.

Se observó que, al someter a ciertas plantas a este tipo de estrés, se presentó en éstas un retraso en su crecimiento, tal es el caso de la planta *Bryonia dioica*, la cual al someterla a estímulos táctiles de frotamiento de la siguiente manera: 30 repeticiones, 2 veces al día por 7 días, se registra un retraso en el desarrollo de la planta de alrededor del 70%.

La ilustración siguiente muestra visualmente este efecto al comparar una planta estimulada de forma táctil con la planta control (sin ningún tipo de estímulo). Es importante mencionar que, al dejar de realizar la estimulación táctil en *Bryonia dioica*, la planta sigue con su desarrollo normal.



*Ilustración 2. Estimulación mecánica en plantas del tipo Bryonia Dioica, la planta de la izquierda representa la planta control, mientras que la de la derecha corresponde a la planta estimulada de forma táctil. Ilustración tomada de la referencia (Jaffe, 1973).*

### **2.2.2. Estímulos acústicos**

Enfocándonos ahora en la aplicación de estímulos mecánicos de tipo acústicos en plantas, podemos encontrar referencias de su aplicación en diferentes etapas del desarrollo de las plantas, los cuales tienen diferentes efectos, en su mayoría positivos en éstas; a su vez su aplicación involucra el desarrollo de diferentes metodologías, algunos ejemplos del uso de estímulos acústicos en plantas son los siguientes.

### **2.2.2.1. Efectos en la germinación de semillas**

Los autores Katherine Creath et al. (Katherine Creath, 2004) querían determinar los efectos de aplicar tratamientos acústicos en etapas tempranas del desarrollo de las plantas de Okra y Zucchini, por lo que elaboraron una cámara de crecimiento que consistió en contenedores plásticos cilíndricos recubiertos con espuma acústica y arena en su interior para cerciorarse de que los estímulos acústicos implementados fueron propagados de forma correcta, es decir, a través del aire.

Se colocó un altavoz en el interior de estas cámaras y un contenedor plástico en suspensión para colocar las semillas utilizadas, las cuales a su vez se colocaron en tres cajas Petri.

Las semillas fueron previamente lavadas, las placas Petri contenían 25 semillas de okra (*Hibiscus esculentus* / *Abelmoschus esculentus*), 25 semillas de zucchini (*Cucurbita pepo*) y por último 25 semillas de okra y 25 semillas de zucchini, como se muestra en la ilustración siguiente.





*Ilustración 3. Cámara acústica utilizada, la cual consiste en un contenedor cilíndrico forrado de espuma acústica, en el interior de este se colocó arena y un contenedor con un altavoz, en suspensión se colocó un recipiente plástico con 3 cajas Petri, las cuales contienen semillas de okra, zucchini y ambas. Ilustración tomada de la referencia (Katherine Creath, 2004).*

Los tratamientos acústicos consistieron en ruidos de la naturaleza y cantos de aves, así como de ruido rosa. Ambos tratamientos fueron aplicados de forma continua durante 16 h al día. El experimento consistió en observar el número de semillas germinadas con respecto al total de semillas en las cajas Petri, se monitorearon cada 12 horas.

Se utilizó un total de 3600 semillas y se observó un aumento de la germinación de semillas al someterlas al tratamiento acústico de sonidos de la naturaleza y cantos de aves.

Por otra parte, para estudiar el efecto de estímulos acústicos en la germinación de semillas de maíz (*Zea mays*) se realizó lo siguiente.

Las pruebas hechas por Vicient, (Vicient, 2017) se llevaron a cabo en una cámara insonorizada, en la cual, en un estante se colocó el altavoz utilizado y en otro diferente las semillas de maíz, con la finalidad de que los estímulos acústicos se propaguen a través del aire.

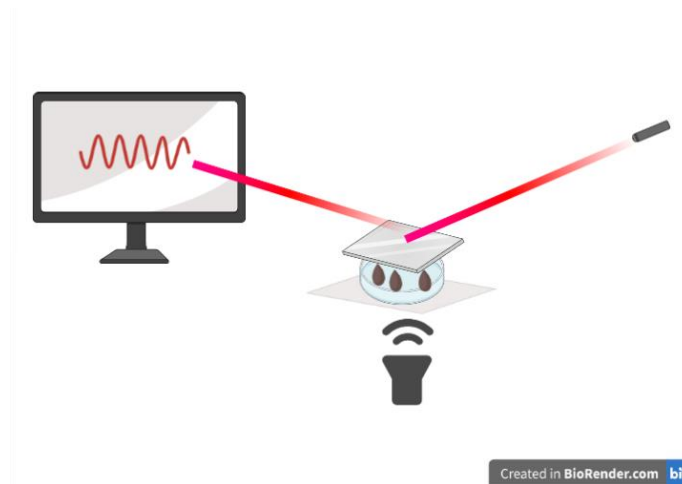
Las semillas fueron previamente lavadas con etanol, cloro y agua esterilizada. Posteriormente se colocaron 20 de ellas en cajas Petri con 8 ml de agua.

Se aplicó un tratamiento acústico de 300Hz 10 h continuas con ayuda del software Audacity. El porcentaje de semillas germinadas se midió cada 12 h por 7 días; obteniendo alrededor de un 10% de incremento de germinación en las semillas tratadas acústicamente.

Refiriéndonos ahora a semillas de plantas de *Arabidopsis thaliana*, los autores Ayuho Uchida et al. (Ayuho Uchida, 2002) utilizaron estímulos mecánicos (vibraciones) aplicados por medio de un generador de vibración sinusoidal. Este generador consistió en un oscilador de baja frecuencia, un amplificador y un altavoz y se colocó una hoja de película plástica frente al altavoz para que funcionara como un diafragma.

Se fija en el centro de la película una caja Petri, la cual contiene las semillas de *A. thaliana* en papel filtro. En la caja Petri se colocó una pegatina metalizada que funciona como un detector de desplazamiento láser.

Esta configuración se muestra en la ilustración siguiente.



*Ilustración 4. Metodología utilizada para determinar los efectos de las vibraciones en plantas de *A. thaliana*, el cual consiste en un generador de vibración sinusoidal, que a su vez está compuesto de un oscilador de baja frecuencia, un amplificador y un altavoz.*

Las semillas de *A. thaliana* se inhibieron en frío a 4°C por 4 días para sincronizar su germinación, Se colocan 30 semillas sobre una hoja de papel filtro en una caja Petri humedecida con 3 ml de agua.

Posteriormente se mantuvieron a 23°C; se aplicó la vibración durante 48 h aproximadamente y luego se apagó y se dejó a las semillas en las mismas condiciones de temperatura.

Se determinó la tasa de germinación relativa de un momento particular ( $t$ ) de la siguiente manera:

*Tasa de germinación relativa de un momento particular ( $t$ ) = Número de semillas germinadas / Número de semillas germinadas 5 días después.*

Finalmente se encontró un incremento en esta tasa al estimular las semillas con vibraciones de una frecuencia de 100 Hz y una amplitud de 0.33 milímetros o al estimularlas con una frecuencia de 70 Hz y una amplitud de 0.42 milímetros, ambos incrementos sucedieron 30 horas posteriores al tratamiento.

### **2.2.2.2. Efectos causados por presencia de polinizadores**

Enfocándonos ahora en los efectos causados en las plantas por las señales acústicas generadas por polinizadores, tenemos lo siguiente.

Los autores Marine Veits et al. (Marine Veits, 2019) expusieron a plantas de *Oenothera Drummondii* a grabaciones de abeja y sonidos de frecuencia similar, estos sonidos se reprodujeron por 3 minutos; cada una de éstos en grupos de 5 y 6 plantas, 10 segundos a cada flor, colocando sobre ellas un altavoz móvil a aproximadamente 10 cm.

Se extrajo el néctar que ya se encontraba en las flores antes del tratamiento con tubos de politetrafluoroetileno (PTFE), se colocaron capilares en las flores, los cuales se retiraron al vaciar la última flor para comenzar con las pruebas realizadas.

Después de 3 minutos de tratamiento se realizó la extracción de néctar y se midió la concentración de azúcar con un refractómetro, encontrando un aumento en un factor de 1.2.

Además de esto, se encontró que las flores vibran mecánicamente en respuesta a estos estímulos, ya que estas pueden modelarse como placas delgadas elásticas; las cuales vibran porque sobre ellas actúa una perturbación periódica. Por lo que los autores infieren que la respuesta de las plantas es de frecuencia específica y ecológicamente relevante.

### **2.2.2.3. Efectos causados por presencia de depredadores**

Por otra parte, para estudiar si existe algún efecto en las plantas causado por la emisión de los sonidos generados por un depredador, se hizo lo siguiente.

Las pruebas realizadas por H.M. Appel et al. (H. M. Appel, 2014) consistieron en someter a plantas de *A. thaliana* de 4 semanas de edad, plantadas en maceta y posteriormente trasplantadas a tubos de plástico para centrifugadora de 50 ml, a grabaciones producidas por el masticar de orugas *Pieris rapae*.

Se utilizó únicamente la roseta de la planta y se detectó un incremento en los niveles de glucosinolato como respuesta de defensa de esta ante la generación y emisión de las grabaciones de orugas.

### **2.2.2.4. Efectos en la morfología de la raíz de la planta**

Finalmente, para estudiar los efectos de tratamientos acústicos en la remoción de contaminantes en la raíz de plantas de espinaca, los autores Su Wang et al. (Su Wang, 2022) realizaron lo siguiente.

Sometieron a las plantas de espinaca de agua (*Ipomoea aquatica Forsk*) a tratamientos acústicos en conjunto con una forma de cultivo hidropónico para reducir la acumulación de Cd en la planta.

Los tratamientos acústicos aplicados fueron los siguientes: I) Se utilizó un PAFT (Plant Acoustic Frequency Technology) y II) se sometió a las plantas a diferentes géneros musicales, los cuales fueron: electrónica, rock y música clásica.

En los tratamientos acústicos que se observaron cambios favorables en la reducción de Cd en las raíces de las plantas de espinaca son los siguientes: Uso de PAFT en el rango de 0 a 2000 Hz (rango de resonancia para algunos cultivos)

3 horas al día por 35 días y la estimulación con música electrónica 8 horas al día por 3 semanas.

Se atribuye esta disminución de Cd a los cambios generados en la morfología de las raíces de las espinacas.

Como vimos, se han desarrollado diferentes metodologías con el fin de aplicar y determinar los efectos de diferentes tipos de tratamientos acústicos en plantas. Sin embargo, no se realiza la aplicación de este tipo de estímulos de forma localizada, es decir enfocándonos en una parte específica de esta, sino que se aplica de forma general a toda la planta.

Podemos percatarnos de la importancia de emitir frecuencias acústicas en el rango de frecuencias de resonancia de las plantas ya que en el caso de los polinizadores (mencionado anteriormente) se determinó que la frecuencia acústica emitida por los polinizadores coincide con la frecuencia de resonancia estimada para la flor y por lo tanto la planta responde a ésta generando más néctar y vibrando a la misma frecuencia.

El aplicar tratamientos acústicos que correspondan a la frecuencia de resonancia de alguna otra parte de la flor, como es el tallo, podría brindarnos información relevante para en un futuro comprender el mecanismo por medio del cual las plantas responden a estímulos acústicos.

## 3. Planteamiento del Problema

### 3.1. Justificación

Aunque actualmente ya existe información acerca de pruebas realizadas referentes a la estimulación acústica en plantas en diferentes etapas de su desarrollo y partes de ésta, como es el caso de la promoción de la germinación de semillas, la remoción de metales presentes en sus raíces (como el caso del Cd), para promover el incremento de néctar en sus flores, etc. se conoce muy poco sobre el rango de frecuencias en el que estas transmiten o reciben señales acústicas.

Se especula que su respuesta, al ser estimuladas con frecuencias específicas es debida al impacto ecológico que este estímulo tiene en su entorno. Además de que existe evidencia que indica que las señales acústicas a las cuales se determina algún tipo de respuesta en éstas se relaciona con la frecuencia de resonancia de este tipo de sistemas, siendo la parte de la planta más estudiada la flor.

Sin embargo, se desconocen los efectos que se tendrían al estimular alguna otra parte de las plantas, como son las hojas, raíces, el tallo, etc. con sus frecuencias de resonancia específicas.

Por lo cual, en este proyecto se propone un método experimental para modelar los tallos de plantas como tubos cilíndricos, debido a sus similitudes morfológicas (ya que los tallos son huecos y cilíndricos).

Lo anterior nos permite un acercamiento y mejor comprensión del papel del tallo de las plantas al someter a estas a tratamientos acústicos, lo que posiblemente a futuro ayude a conocer el mecanismo por el cual se transmiten estos estímulos,

además de adicionar información respecto al poco conocido rango acústico de respuesta de las plantas.

### **3.2. Hipótesis**

Los tallos de espinaca tienen un comportamiento acústico similar al de tubos cilíndricos.

### **3.3. Objetivo general**

- Determinar las frecuencias de resonancia acústica, la frecuencia fundamental y los respectivos armónicos de tallos cilíndricos de espinacas

### **3.4. Objetivos particulares**

- Desarrollar un método experimental que permita determinar las frecuencias de resonancia, la frecuencia fundamental y los respectivos armónicos de tallos cilíndricos de espinacas y de tubos metálicos.
- Determinar las frecuencias de resonancia, la frecuencia fundamental y los respectivos armónicos de tres tubos metálicos de aluminio de diferentes longitudes como validación al método implementado.
- Determinar la curva de potencia acústica transmitida en tallos cilíndricos de espinaca.



## 4. Metodología.

En la siguiente sección se describen los pasos seguidos para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto, es decir, los arreglos experimentales hechos, las consideraciones tomadas, los softwares utilizados, etc.

En cada subsección se comienza hablando sobre algunos conceptos clave para tener un mejor entendimiento de cómo y por qué se optó por seguir la metodología propuesta.

### 4.1. Construcción del modelo experimental.

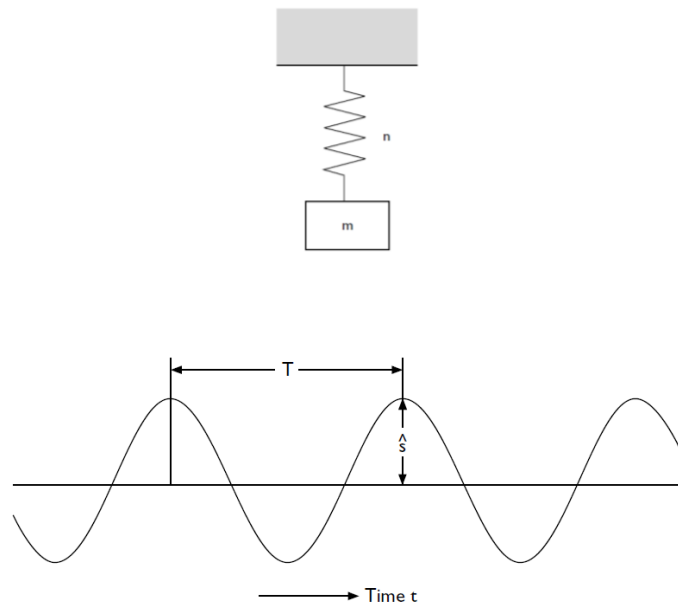
Antes de describir la forma en que se construye el modelo experimental implementado en este proyecto se mencionan algunos conceptos relevantes para el mejor entendimiento de este.

#### 4.1.1. Conceptos Importantes.

##### **Resonancia acústica.**

Para comprender mejor este concepto, partiremos del concepto de oscilador armónico.

**Oscilador armónico.** Tomado de (Thomas D. Rossing, 1995)



*Ilustración 5. Representación de un movimiento oscilatorio, el cual es generado por la unión de una masa y un resorte al desplazar ésta una cierta distancia. Tomado de (Kuttrutt, 2007)*

Sea una masa  $m$  unida a un resorte de constante  $k$ , de modo tal que la ecuación que representa este movimiento es de la forma

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1)$$

Donde:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2)$$

Esta ecuación tiene soluciones de la forma de senos y cosenos, la frecuencia  $f_0$  denota la repetitividad de la señal

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (3)$$

El periodo de este movimiento es de la forma:

$$T = \frac{1}{f_0} \quad (4)$$

Cuando la frecuencia de oscilación del sistema es tal que ante un estímulo externo el sistema oscila con una amplitud máxima se dice que el sistema entra en un estado de resonancia.

Por lo que el fenómeno de resonancia requiere de:

- un sistema que presente frecuencias naturales de vibración
- un estímulo externo de tipo periódico que actúe sobre el sistema
- una coincidencia entre ambos tipos de frecuencia. (José Antonio Peralta, 2009)

*“Sometimes it is desired that the system respond strongly to only one particular frequency. If the mechanical resistance of a simple oscillator is small, its impedance will be relatively large at all frequencies except those in the immediate vicinity of resonance, and such an oscillator will consequently respond strongly only in the vicinity of resonance.”* (Lawrence E. Kinsler, 2000)

**Impedancia Acústica.** Tomado de (Wolfe J. , 2023)

Indica cuánta presión de sonido genera un flujo acústico a una frecuencia específica.

Por lo que se denomina impedancia acústica a la relación entre la presión y el flujo acústicos. De modo tal que podemos expresarla de la siguiente manera

$$Z = \frac{p}{U}$$

Donde:

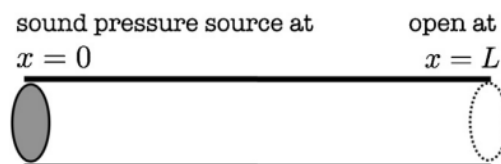
$Z$ : Impedancia acústica

$p$ : Presión de sonido

$U$ : Flujo acústico

**Frecuencia de resonancia en tubos.** Tomado de (Tohyama, 2020)

Para un tubo abierto como se muestra en la siguiente ilustración:



*Ilustración 6. Representación esquemática de un tubo cilíndrico de longitud  $L$ . Ilustración tomada de (Tohyama, 2020)*

Y dado que podemos definir al sonido como una onda vibracional, se puede utilizar la ecuación de onda en una dimensión para representarla, cuya solución es de la forma:

$$g(ct \pm x) = Ae^{ik(ct \pm x)} = Ae^{i(\omega t \pm kx)} \quad (5)$$

Y sabiendo que, a través de un tubo se propaga más de una onda tanto en dirección positiva como negativa, podemos representar esto como:

$$p(x, t) = (Ae^{-ikx} + Be^{ikx})e^{i\omega t} \quad (6)$$

Tomando como condiciones de frontera:

$$p(x, t)|_{x=0} = p_0 e^{i\omega t} \quad y \quad p(x, t)|_{x=L} = 0 \quad (7)$$

La solución a la ecuación debe ser tal que:

$$A + B = p_0 \quad y \quad Ae^{-ikL} + Be^{ikL} = 0 \quad (8)$$

Resolviendo para  $A$  y  $B$ :

$$p(x, t) = p_0 \frac{\sin k(L - x)}{\sin kL} e^{i\omega t} \quad (9)$$

Las frecuencias de resonancia en tubos cilíndricos serán donde se cumple que:

$$\sin k_n L = \sin \frac{\omega_n}{c} L = 0 \quad (10)$$

De modo tal que, podemos expresarlas como:

$$\omega_n = f_n = \frac{c n}{2L} \quad (11)$$

Debido a que el extremo abierto del tubo irradia sonido al medio circundante, la fórmula (11) necesita de una corrección. Se ha encontrado que es necesario reemplazar  $L$  por  $L_{eff}$ , en donde  $L_{eff} = L + 0.6d$  es la llamada “longitud efectiva” del tubo (Lawrence E. Kinsler, 2000). La derivación de este factor de corrección no es trivial; se ha empleado inclusive el concepto de “esfera de vórtice acústicamente resonante” o “acoustically resonating vortical sphere” para explicar este factor (Bernhardt H. Edskes, 2022), por lo que se recomienda la lectura de las referencias citadas a los lectores interesados. De este modo las frecuencias de resonancia para nuestro sistema serán de la forma:

$$f_n = \frac{nc}{2(L + 0.6d)} \quad (12)$$

Donde:

$f$ : Frecuencias de resonancia del sistema

$n$ : número entero positivo, nodo de resonancia

$L$ : longitud del tubo

$c$ : velocidad del sonido en aire (343 m /s)

$d$ : diámetro del tubo

### Frecuencia fundamental.

De la definición anterior, podemos definir como frecuencia fundamental al primer valor de la frecuencia de resonancia de un sistema, en este caso tubos cilíndricos.

Es decir:

$$f = \frac{c}{2(L + 0.6d)} \quad (13)$$

### Armónicos.

Los armónicos del sistema se definirán como múltiplos de la frecuencia fundamental, es decir son todos los valores de las frecuencias de resonancia de un sistema para  $n > 1$ .

**Hertz.** Tomado de (Lawrence E. Kinsler, 2000)

Unidad de frecuencia, equivalente a un ciclo por segundo.

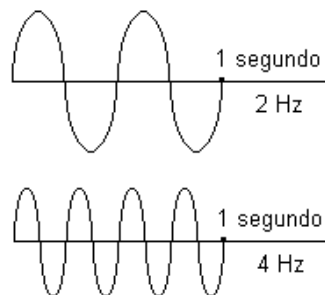


Ilustración 7. Representación esquemática de la definición de Hertz. Ilustración tomada de <https://compuycom.com.ar/Libro/frecuencia.gif>

**Micrófono de condensador.** Tomado de (Pawera, 2010)

Se construye como un capacitor de placas paralelas, de modo tal que, al vibrar el diafragma de este en respuesta a una onda de sonido, la distancia entre las placas y consecuentemente el voltaje entre estas fluctúa creando una señal eléctrica, la cual es representativa de la onda acústica.

**Osciloscopio.** Tomado de (Hickman, 1995)

Dispositivo que muestra gráficamente las variaciones de voltaje de una señal eléctrica. Con este podemos conocer además el periodo o la frecuencia de esta.

**Transmitancia.**

Comenzaremos por definir de forma muy general la transmitancia luminosa y la transmitancia térmica.

- Transmitancia luminosa. Tomada de (James J. Licari, 2011) "*cantidad de luz que pasa a través de un material transparente*"
- Transmitancia térmica. Tomado de (Willoughby, 2002) "*Capacidad de un elemento de estructura para transmitir calor en condiciones de estado estable*"

Por lo que análogamente podemos definir la transmitancia acústica como la cantidad de "sonido" que se propaga a través de un medio. O como la capacidad



que tiene un elemento de estructura para transmitir ondas acústicas en condiciones de estado estable.

De forma general, decimos que: *Transmitancia = Potencia acústica transmitida / Potencia acústica incidente.*

**Onda acústica.** Tomado de (Lawrence E. Kinsler, 2000)

*“Las ondas acústicas constituyen un tipo de fluctuación de presión que puede existir en un fluido comprimible... Las fuerzas restauradoras responsables de propagar una onda son los cambios de presión que ocurren cuando el fluido se comprime o expande. Los elementos individuales del fluido se mueven hacia adelante y hacia atrás en la dirección de las fuerzas, produciendo regiones adyacentes de compresión y rarefacción”.*

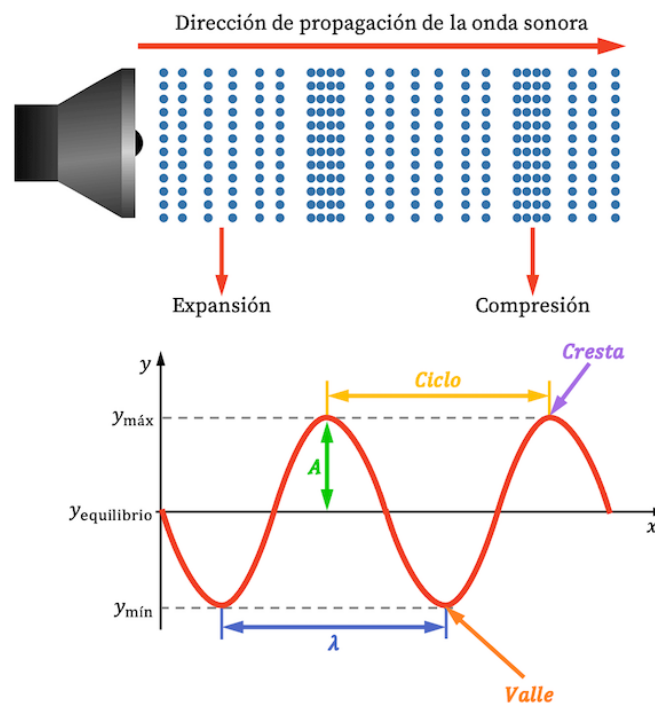


Ilustración 8. Representación esquemática de la propagación de una onda por medio de un altavoz. Ilustración Tomada de <https://www.ingenierizando.com/cinematica/onda-sonora-onda-de-sonido/>

#### 4.1.2. Construcción de las partes del método experimental

Visto de forma muy general, el método experimental propuesto para poder determinar que efectivamente los tallos de espinacas se comportan como tubos, es decir, determinar que la resonancia de estos, así como su frecuencia fundamental y sus respectivos armónicos coinciden con los valores obtenidos teóricamente para tubos cilíndricos, está basado en los puntos clave que se muestran en la ilustración siguiente.



*Ilustración 9. Esquema general de los pasos a seguir para desarrollar de forma correcta una metodología que permita conocer los valores de resonancia, frecuencia fundamental y armónicos de tubos y tallos de espinaca.*

Como primer paso, se deben generar diferentes frecuencias específicas, las cuales tienen unidades de Hertz (Hz), estas a su vez serán transmitidas por medio de una fuente de emisión que en este caso será un auricular, este auricular se encuentra a una distancia muy pequeña, del orden de unos cuantos milímetros, sin hacer contacto del tallo o tubo de interés.

Es importante mencionar que, el tallo o tubo deberá estar en suspensión para asegurar que la propagación de la onda acústica transmitida es a través del aire y no de la superficie en la cual se encuentran apoyados.

Una vez que esta frecuencia se emitió a través del tallo o tubo, un micrófono de condensador, que es la fuente receptora, que de igual forma que el auricular, se encuentra cercano al tallo, del orden de milímetros sin hacer contacto, recibe la señal.

La señal capturada con ayuda de un osciloscopio (conectado al micrófono) se guarda para posteriormente pasar al análisis de los datos obtenidos y finalmente obtener un gráfico de la respuesta del tallo o tubo, es decir un gráfico de potencia acústica transmitida como función de la frecuencia.

Este proceso se llevó a cabo en dos etapas, las cuales son la obtención de los datos y el análisis de éstos; cada una de estas etapas involucra el desarrollo de dos diferentes programas computacionales.

#### **4.2. Desarrollo de Software *LabVIEW*.**

Antes de describir la forma en que se desarrolló el software implementado en este proyecto se mencionan algunos conceptos relevantes para el mejor entendimiento de este.

##### **4.2.1. Conceptos importantes.**

**Transformada de Fourier.** Tomado de (Kuttrutt, 2007)

Dado que las vibraciones acústicas se descomponen en vibraciones armónicas sinusoidales, una función  $f(t)$  continua y periódica, de periodo  $T$ , puede ser representada por series, denominadas series de Fourier, en donde cada término de ésta representa un armónico del sistema, de modo tal que:

$$f(t + T) = f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{j2\pi n t/T} \quad (14)$$

Para  $n$ : entero positivo o negativo. Si  $f(t)$  es una función dada, podemos calcular los coeficientes de Fourier como:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) e^{-j2\pi nt/T} dt \quad (15)$$

Donde:  $t$  es la variable en el espacio de la frecuencia, y  $j = (-1)^{1/2}$ . Si  $f(t)$  es una función real, podemos expresarla como:

$$f(t) = C_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \text{Re}\{C_n e^{j2\pi nt/T}\} \quad (16)$$

La parcial con frecuencia  $2\pi/T$  se denomina vibración o frecuencia fundamental, mientras que los coeficientes  $C_n$  forman el espectro de la función.

**El espectro de potencia.** Tomado de (Schowengerdt, 1997)

La transformada de Fourier de una función real casi siempre es una función compleja, la cual se define como:

$$f(t) = R(t) + i I(t) \quad (17)$$

Lo que también podemos expresar como:

$$f(t) = |f(t)| e^{j\phi(t)} \quad (18)$$

Del modo que:

$$|f(t)| = \sqrt{(R(t))^2 + (I(t))^2} \text{ y } \phi(t) = \arctan[I(t)/R(t)] \quad (19)$$

$|f(t)|$  se denomina espectro de Fourier y  $\phi(t)$  es el ángulo de fase.

El **espectro de potencia** se define como:

$$P(t) = |f(t)|^2 = (R(t))^2 + (I(t))^2 \quad (20)$$

Este tiene unidades de:  $m^2/Hz$ ,  $N^2/Hz$ ,  $V^2/Hz$ .

Una de las primeras formas de determinar el espectro de este tipo de funciones o señales de forma experimental fue con ayuda de los resonadores de Helmholtz. (Kuttrutt, 2007).

**Resonancia de Helmholtz.** Tomado de (Wolfe J. , 2023)

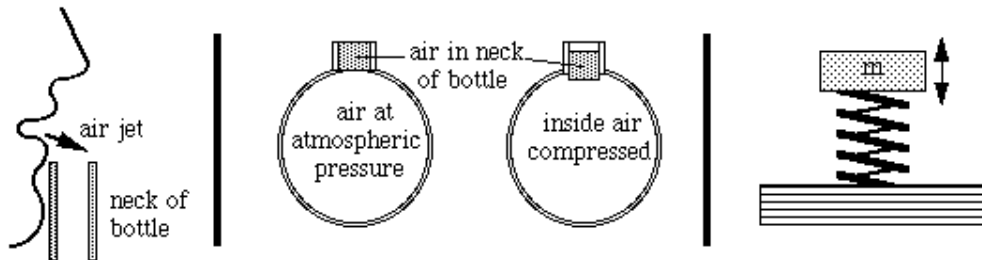


Ilustración 10. Resonador de Helmholtz. Ilustración tomada de <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/Helmholtz.html>

Análogamente al oscilador armónico, se empuja con una fuerza oscilatoria  $F$ , a una frecuencia  $f$ , la masa  $m$  (aire en el cuello del resonador) que se apoya en el resorte (aire encerrado) de constante  $k$ , cuyo extremo está fijo (el aire en el resonador no puede escapar).

La fuerza requerida para acelerar la masa es proporcional a la aceleración, a su vez esta es proporcional al cuadrado de la frecuencia. A una frecuencia baja, la fuerza requerida para acelerar la masa es muy pequeña, por lo que  $F$  solo tiene que comprimir y extender el resorte.

A una frecuencia suficientemente alta, la fuerza del resorte es muy pequeña en comparación con la que acelera la masa.  $F$  está en fase con la aceleración.

A la frecuencia del resonante, la amplitud puede ser grande para una fuerza muy pequeña. Entonces en resonancia la impedancia es muy baja, es decir, que hay un flujo máximo de aire dentro y fuera del resonador.

#### **4.2.2. Desarrollo del Software.**

Una vez instalado el software (versión *LabVIEW comunity*) se descargó el driver para el osciloscopio que vamos a utilizar, el cual es el tektronix TDS2024B, de modo tal que este driver nos permita hacer una conexión entre el software y la computadora para automatizar el proceso de toma de datos.

El software funciona de la siguiente manera:

Una vez que se conecta el osciloscopio a la computadora por medio de un cable US. En el menú de ayuda de *LabVIEW* para el driver utilizado, se encuentra una

rutina que permite establecer comunicación entre el osciloscopio y la computadora.

Esto tiene como objetivo el poder manipular el osciloscopio directamente desde nuestro ordenador, además de que este ejemplo nos permite visualizar las señales recibidas en el osciloscopio, que en este caso son a través del micrófono utilizado.

Por lo que se parte de modificar esta rutina para desarrollar la que necesitamos implementar.

A esta rutina se le incluyó un generador de tonos, los tonos se generan en forma de ciclos, siendo estos un total de 10. Se establece una frecuencia inicial, denominada  $w_0$  y el incremento  $\Delta w$  que habrá entre cada ciclo; estos parámetros son ajustables y se definen antes de comenzar las mediciones.

Posterior a esto, a los datos capturados por el osciloscopio se les aplica la transformada de Fourier de modo tal que podamos visualizar ambas señales en la computadora.

Finalmente, se guardan en la computadora de uno por uno los datos capturados referentes a la señal transmitida como función del tiempo (mostrada en la pantalla del osciloscopio), en archivos con terminación “. *lvm*”, estos archivos están numerado.

Los datos obtenidos serán procesados en la siguiente rutina, desarrollada en *Mathematica*.

La forma gráfica de la rutina implementada en *LabVIEW* se encuentra en el anexo 2 de este documento.

### 4.3. Desarrollo de Software en Mathematica

#### 4.3.1. Desarrollo del software.

El objetivo principal del desarrollo de la siguiente rutina en *Mathematica* fue el realizar el procesamiento de datos de forma optimizada, es decir, indicar al programa cuáles archivos deseo abrir, obtener el espectro de potencias de cada uno de esto y finalmente encontrar el gráfico de potencia acústica transmitida como función de las frecuencias correspondiente a cada tallo o tubo.

Por lo cual, se crea un ciclo que ejecuta lo siguiente.

Se Importan los archivos generados por el osciloscopio, es decir 100 archivos, cada uno corresponde a cada frecuencia emitida por el auricular y recibida por el micrófono. Después se obtiene el espectro de potencia de la señal transmitida en los tallos o tubos para cada uno de los archivos importados, de forma gráfica se representa como en la siguiente ilustración.

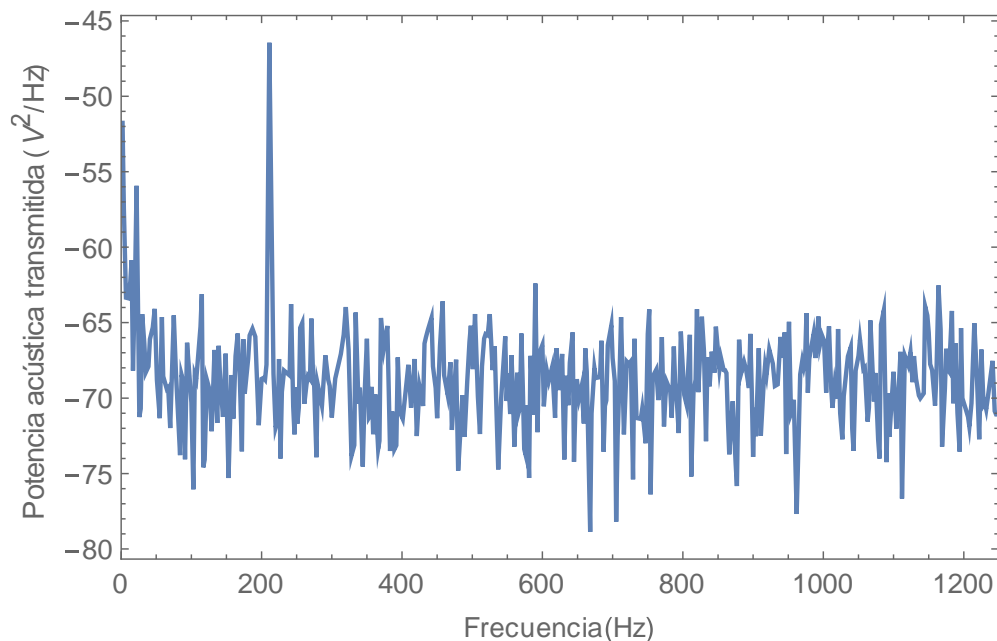
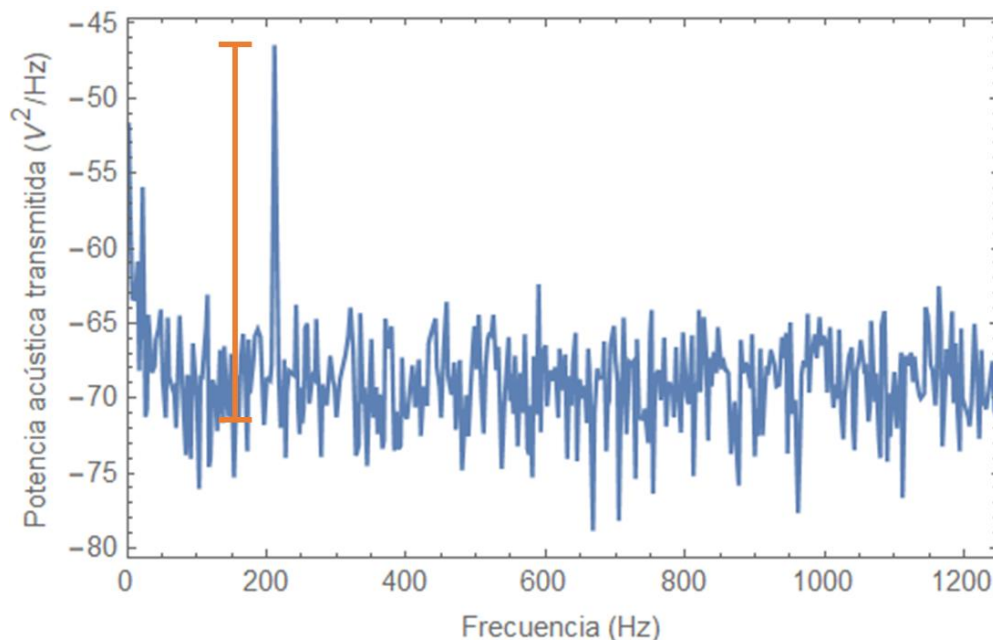


Ilustración 11. Ejemplo de espectro de potencia de una señal transmitida en los tallos de espinaca o tubos cilíndricos.



Lo que sigue es encontrar el valor máximo de la señal, cuando ya lo tenemos identificado, es decir cuando conocemos su valor en el eje x (frecuencia a la que se localiza el máximo) se procede a determinar la altura de este y se guarda este valor.



*Ilustración 12. Determinación y localización en Mathematica del valor máximo de la señal transmitida en el espectro de potencia, la cual corresponde al pico representado en la ilustración, la línea roja corresponde a la altura de este.*

Se repite este proceso para cada uno de los archivos importados, para finalmente, con los datos guardados, correspondientes a la altura de los máximos obtenidos en el espectro de potencia que corresponden a las frecuencias transmitidas, obtener el gráfico de la respuesta del tallo o tubo de interés.

La rutina hecha en *Mathematica* se encontrará en el anexo 1 de este documento.

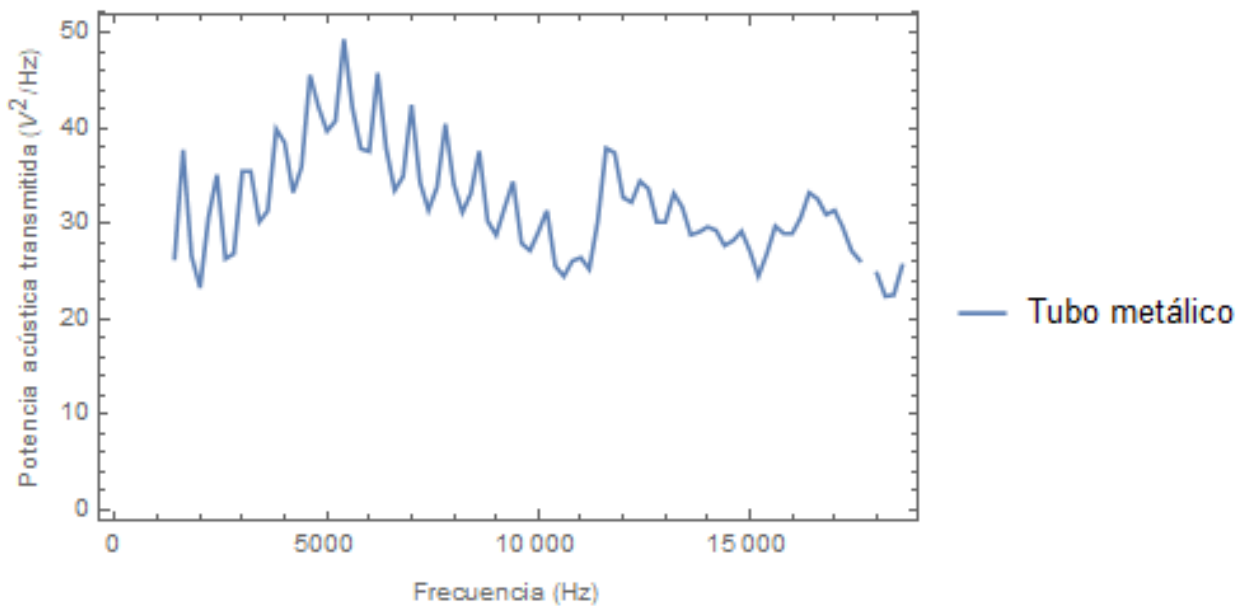


Ilustración 13. Gráfico de la respuesta de un tubo metálico al someterlo a estímulos acústicos, es decir, potencia acústica transmitida como función de las frecuencias

#### 4.4. Determinación del rango de frecuencias.

Antes de describir la forma en que se determinó el rango de frecuencias implementado en este proyecto se menciona el teorema de Nyquist, el cual es relevante para el mejor entendimiento de esto.

##### 4.4.1. Conceptos importantes.

**Teorema de Nyquist.** Tomado de (Emiel Van Kootter, 2019)

Sea  $x_a(t)$  una señal analógica tal que si  $F_{m\acute{a}x} = B$  es la frecuencia más alta

contenida en la señal y la señal se muestrea a una tasa  $F_s > 2 F_{m\acute{a}x} \Rightarrow x_a(t)$  tiene toda la informaci3n necesaria para reproducir la se1al.

#### 4.4.2. Determinaci3n del rango de frecuencias.

En el osciloscopio se tiene una frecuencia de muestreo fija de 2500 puntos, lo que se puede modificar es el tiempo de captura de estos, si tenemos una se1al representada con 2500 puntos en 0.05 s, por segundo tendremos un total de **50 000 puntos/s**

Sea N: N3mero de puntos para reproducir una se1al, del modo que:

$$N = \frac{\Delta t}{T} \quad (21)$$

Donde:

$\Delta t$ : tiempo de muestreo = 0.05

$T$ : Periodo de la se1al.

En los casos l3mites de detecci3n del micr3fono y auricular utilizados, es decir para una se1al con una frecuencia de 20 kHz y 30Hz tenemos lo siguiente

Para 20 KHz:  $10^3$  puntos para reproducir señal, es suficiente para poder representarla.

Para 30 Hz: 1.5 puntos para reproducir señal, no es posible representarla.

Para tener una N mínima de 10, es decir, poder representar una señal con 10 puntos, se requiere una frecuencia mínima de 200 Hz.

Por lo tanto, el rango de frecuencias utilizado será de 200 a 20kHz, el cual es consistente con lo planteado en el teorema de Nyquist.

A continuación, se presentan los resultados y resultados previos obtenidos que permiten determinar que los tallos cilíndricos de espinacas se comportan acústicamente como tubos cilíndricos metálicos.

## 5. Resultados.

En la siguiente sección se presentan los resultados principales obtenidos a lo largo de este proyecto, así como los resultados preliminares que fueron necesarios para validar el método implementado en este trabajo.

### 5.1 Respuesta natural del micrófono

Una vez desarrollada la metodología propuesta, el primer paso que debemos realizar es determinar cuál es la respuesta natural de nuestra fuente de recepción, es decir cómo el micrófono captura las diferentes frecuencias emitidas por el auricular (fuente de emisión. Lo cual se representa con un gráfico de potencia acústica transmitida como función de la frecuencia.

Para realizar todas las pruebas expuestas en este documento se utilizó un micrófono de condensador de marca Behringer modelo ECM8000.

Para evaluar la respuesta natural que tiene el micrófono se colocó éste a una distancia aproximada de 1 cm frente al auricular utilizado, ambos en suspensión para evitar que la onda acústica transmitida se propague a través de la superficie de montaje y no del aire. El montaje experimental se muestra en la ilustración siguiente.



Ilustración 14. Montaje experimental para determinar la respuesta natural de la fuente de recepción (micrófono) utilizada, ambos se encuentran en suspensión.

Posterior a esto, se ejecutó el software desarrollado en *LabVIEW* para la obtención de datos y el software desarrollado en *Mathematica* para en análisis de éstos, obteniendo lo siguiente.

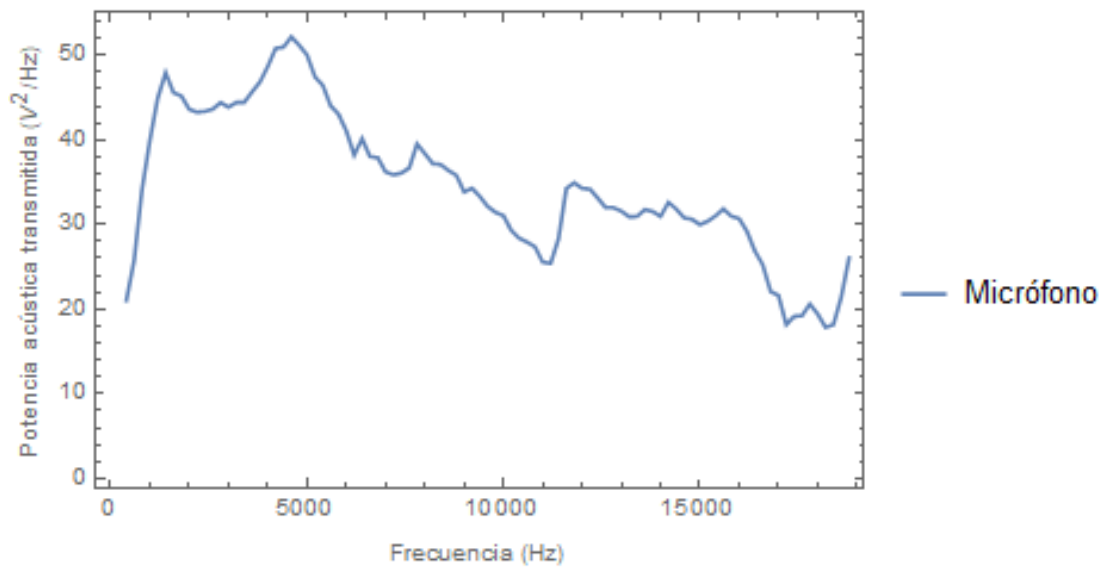


Ilustración 15. Respuesta natural del micrófono, uso de auricular como fuente de emisión

Sin embargo, el fabricante del micrófono muestra una respuesta casi constante, por lo que al realizar la misma medición cambiando únicamente la fuente de emisión, es decir, utilizando la bocina integrada en nuestro ordenador.

Se obtiene una respuesta similar a la mostrada por el fabricante (ilustración siguiente) de modo tal que podemos inferir que la curva de potencia acústica transmitida obtenida corresponde a la respuesta natural del auricular.

Optamos por continuar utilizándolo debido a que no se encontró alguna opción en el mercado que pueda minimizar de forma considerable esta respuesta.

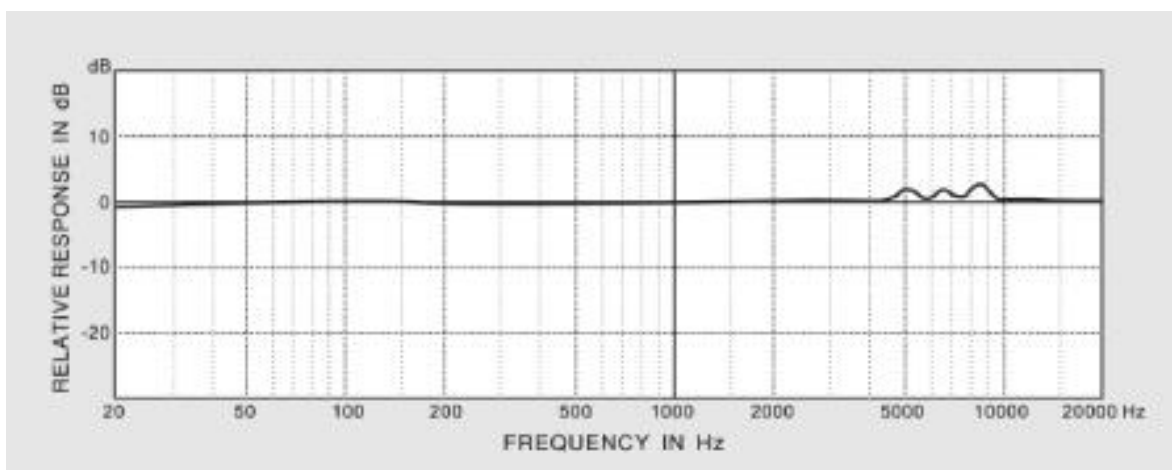


Ilustración 16. Respuesta natural del micrófono dada por el fabricante. Ilustración tomada de <https://www.behringer.com/product.html?modelCode=P0118>

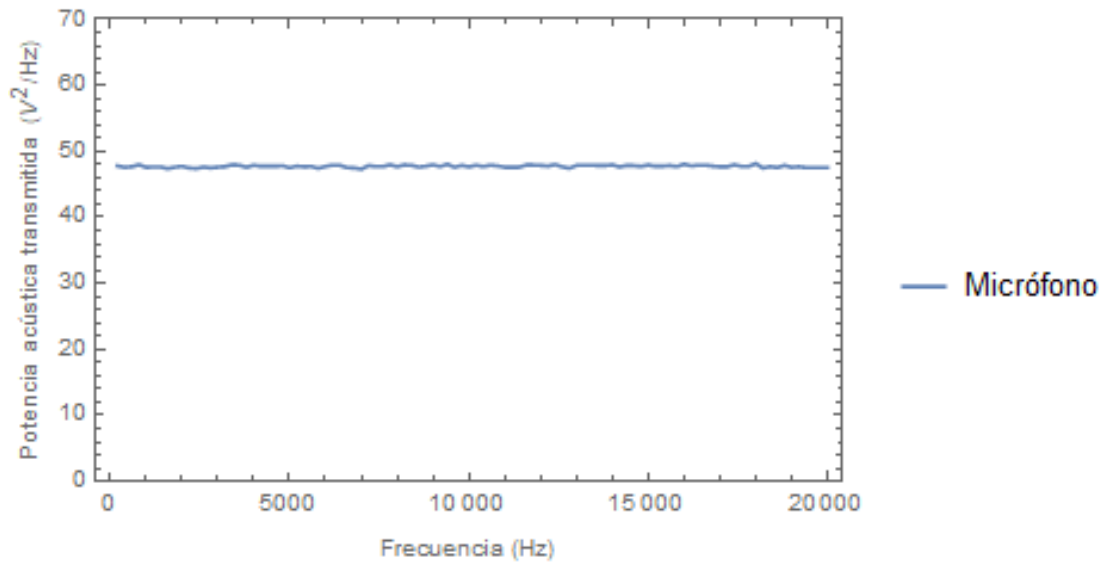


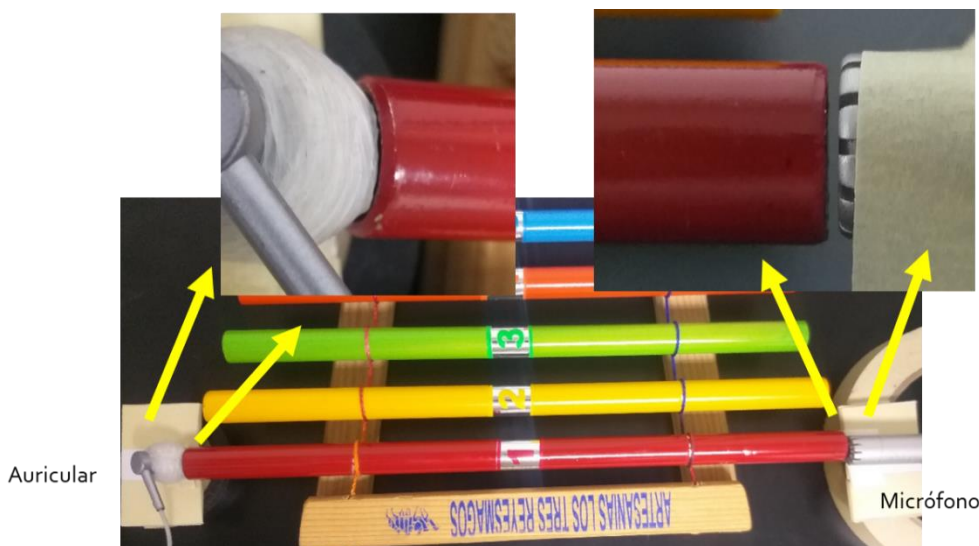
Ilustración 17. Respuesta natural del micrófono al tener como fuente de emisión la bocina integrada en la computadora.



## 5.2. Validación de la metodología

Una vez determinada la respuesta natural del micrófono, la cual servirá como punto de referencia, se debe validar la metodología seguida, es decir, se determinará la potencia acústica transmitida de 3 tubos metálicos de diferente longitud, para con ello conocer su frecuencia de resonancia, su frecuencia fundamental y sus respectivos armónicos. Se compararán los resultados obtenidos de forma experimental con sus valores teóricos.

La forma de montar el experimento fue la siguiente: se acopló en los extremos de los tubos el auricular y el micrófono sin que exista contacto entre estos, de modo tal que su distancia de separación sea del orden de unos cuantos milímetros, se comienzan a realizar las mediciones correspondientes, es decir, repetir 3 veces el experimento, obtener un promedio para cada tubo y finalmente graficar la respuesta de cada uno de estos.



*Ilustración 18. Montaje experimental para determinar la potencia acústica transmitida de tubos metálicos como validación a la metodología propuesta.*

Los tubos utilizados tienen todos unos diámetros de 1 cm, pertenecen a un xilófono, son de aluminio, su longitud, así como la frecuencia esperada para cada tubo es la siguiente.

	Longitud (cm)	Frecuencia esperada (Hz)
Tubo pequeño	12.9	1270
Tubo mediano	18.6	893
Tubo grande	26.5	633

1. Longitud de los 3 tubos metálicos utilizados y la frecuencia fundamental esperada para cada uno de éstos.

Los resultados obtenidos para los 3 tubos metálicos son los siguientes.

### **Tubo pequeño**

La frecuencia de resonancia esperada para el tubo denominado pequeño, cuya longitud es de 12.9 cm es de 1270 Hz, la frecuencia fundamental corresponde a la señalada con la primera línea vertical y las siguientes corresponden a los armónicos del tubo. Para este caso, debido al rango de frecuencias acústicas (200 a 20000 KHz) de las señales transmitidas a través de éste se espera que sean un total de 14 armónicos.

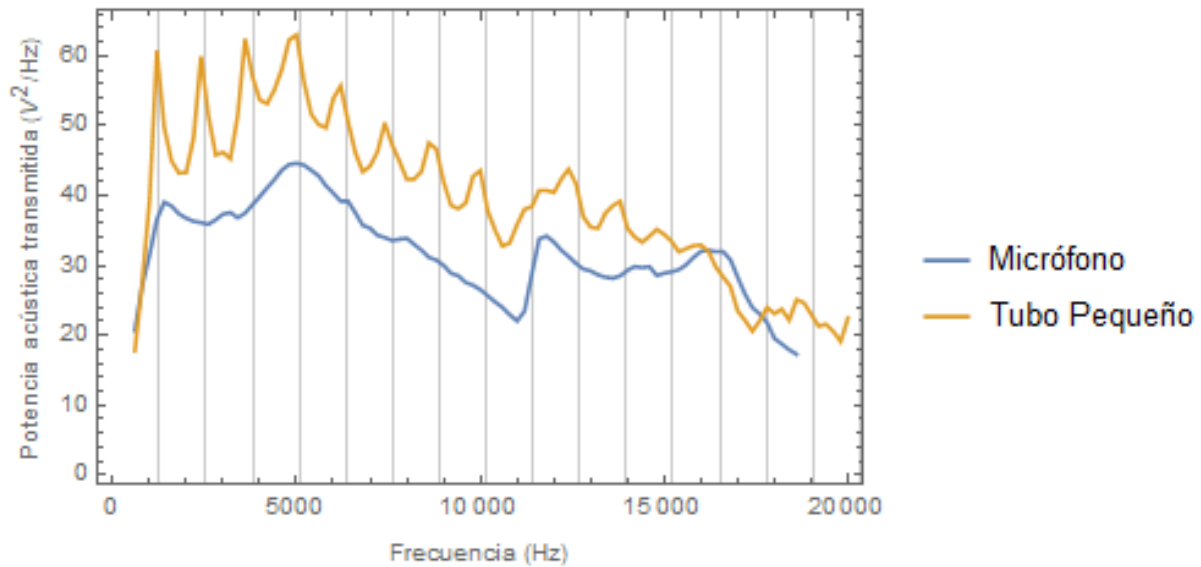


Ilustración 19. Gráfico de la respuesta acústica del tubo pequeño, las líneas horizontales representan la frecuencia a la cual se espera que aparezcan sus armónicos, siendo la primera línea la frecuencia fundamental, cuyo valor es 1270 Hz.

### Tubo mediano

La frecuencia de resonancia esperada para el tubo denominado mediano, cuya longitud es de 18.6 cm es de 893 Hz, la frecuencia fundamental corresponde a la señalada con la primera línea vertical y las siguientes corresponden a los armónicos del tubo. Para este caso, debido al rango de frecuencias acústicas (200 a 20000 KHz) de las señales transmitidas a través de éste se espera que sean un total de 21 armónicos.

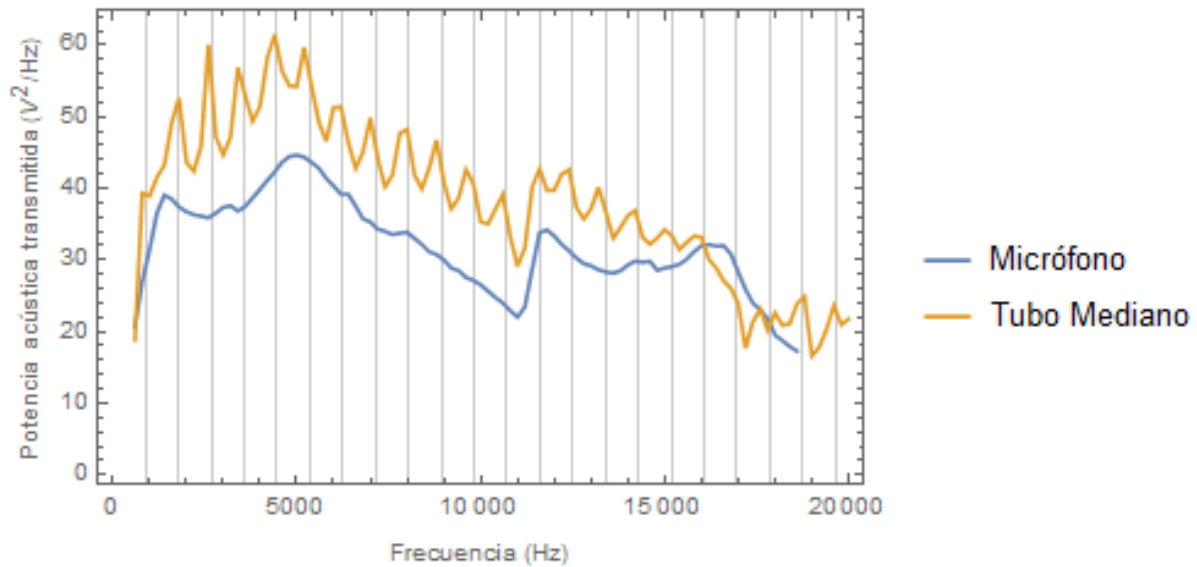
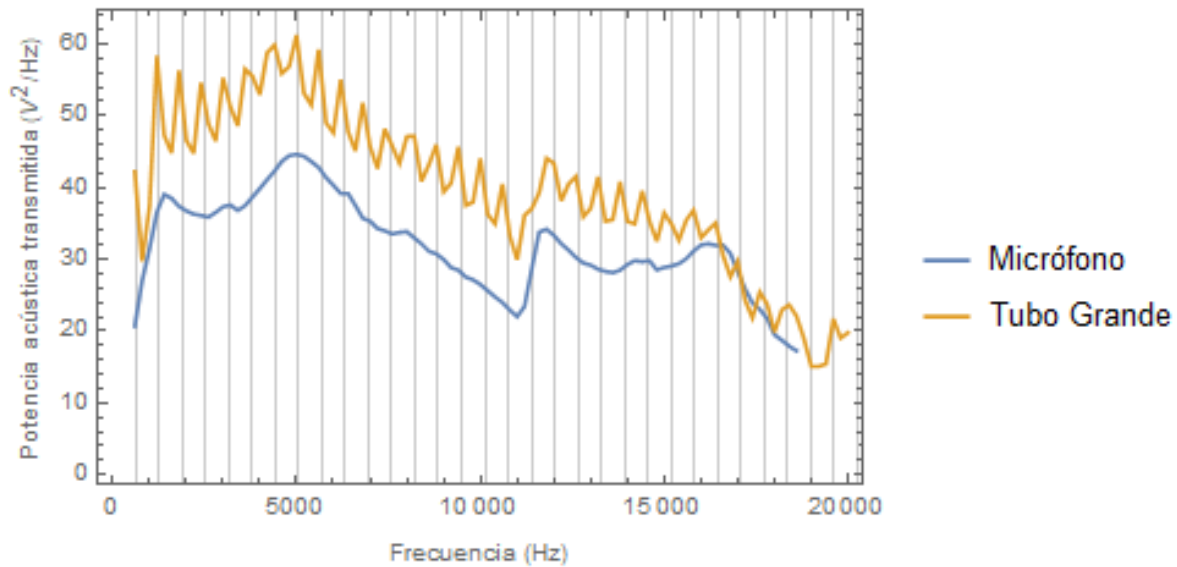


Ilustración 20. Gráfico de la respuesta acústica del tubo mediano, las líneas horizontales representan la frecuencia a la cual se espera que aparezcan sus armónicos, siendo la primera línea la frecuencia fundamental, cuyo valor es 893 Hz.

### Tubo grande

La frecuencia de resonancia esperada para el tubo denominado grande, cuya longitud es de 26.5 cm es de 633 Hz, la frecuencia fundamental corresponde a la señalada con la primera línea vertical y las siguientes corresponden a los armónicos del tubo. Para este caso, debido al rango de frecuencias acústicas (200 a 20000 KHz) de las señales transmitidas a través de éste se espera que sean un total de 30 armónicos.



*Ilustración 21. Gráfico de la respuesta acústica del tubo grande, las líneas horizontales representan la frecuencia a la cual se espera que aparezcan sus armónicos, siendo la primera línea la frecuencia fundamental, cuyo valor es 633 Hz.*

Al aumentar la longitud de los tubos metálicos utilizados disminuye la frecuencia fundamental esperada y esto aumenta el número de armónicos esperados para cada tubo.

Podemos observar que en todos los casos existe una relación entre la frecuencia fundamental y los armónicos calculados de forma teórica y experimental para cada tubo, ya que los “picos” observados en los gráficos de potencia acústica transmitida como función de la frecuencia corresponden en gran medida a los valores que éstos deberían tener de forma teórica.

Por lo que podemos inferir que el método desarrollado funciona de forma correcta y es posible aplicarlo para determinar la potencia acústica transmitida en tallos cilíndricos de espinaca.

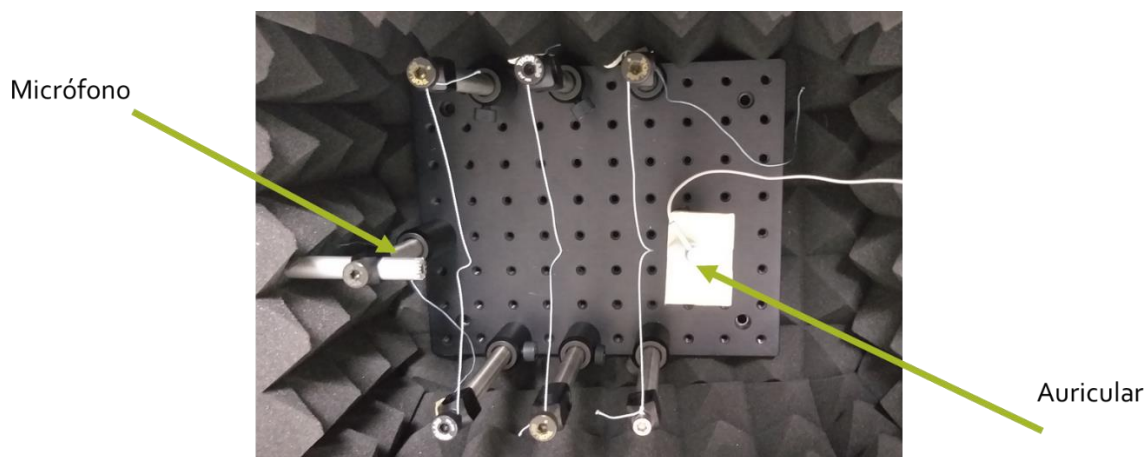
### 5.3. Medición de la potencia acústica transmitida de tallos

La forma de montar el experimento fue similar a la empleada para los tubos metálicos, se acopló en los extremos de los tallos el auricular y el micrófono sin que exista contacto entre estos, de modo tal que su distancia de separación sea del orden de unos cuantos milímetros, se comienzan a realizar las mediciones correspondientes, es decir, repetir 3 veces el experimento, obtener un promedio para cada tallo y finalmente graficar la respuesta de cada uno de estos.

La forma de montar el experimento excluyendo el uso de una cámara acústica es la siguiente



*Ilustración 22. Montaje experimental.*



*Ilustración 23. Vista del arreglo realizado al interior de la caja de aislamiento acústico.*

Todos los tallos de espinaca utilizados para las mediciones siguientes fueron conseguidos en HEB, posterior a su compra se mantuvieron en refrigeración hasta el momento de utilizarlos, todos los tallos cuentan con un diámetro aproximado de 4 mm, las longitudes de los tallos utilizados, así como la frecuencia fundamental y el número de armónicos esperados para cada uno de éstos son las siguientes

Tallo	Longitud (cm)	Frecuencia esperada (Hz)	Número de armónicos esperado.
1	17.3	978	19
2	15.6	1083	17
3	13.5	1248	15
4	13.2	1276	14
5	20.1	843	22

*2. Longitud de los tallos utilizados, frecuencia fundamental y número de armónicos esperado para cada uno de éstos.*

Los resultados obtenidos en las primeras pruebas realizadas para determinar la potencia acústica transmitida de estos tallos son los siguientes.

- Tallo de espinaca 1

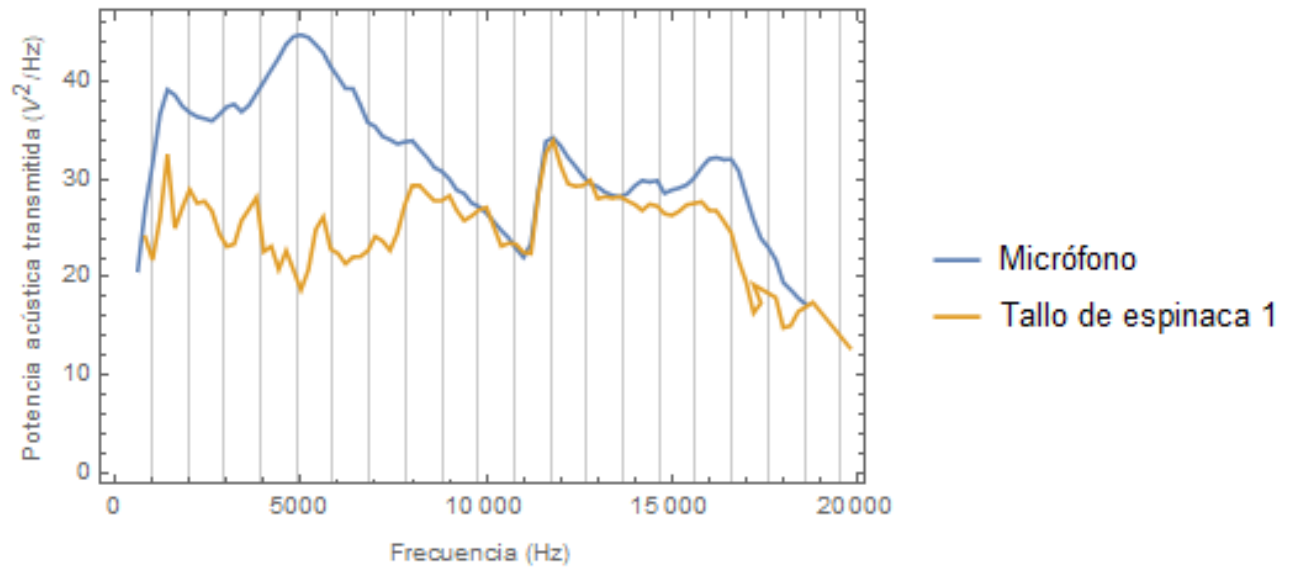


Ilustración 24. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 1 es de 978 Hz

- Tallo de espinaca 2

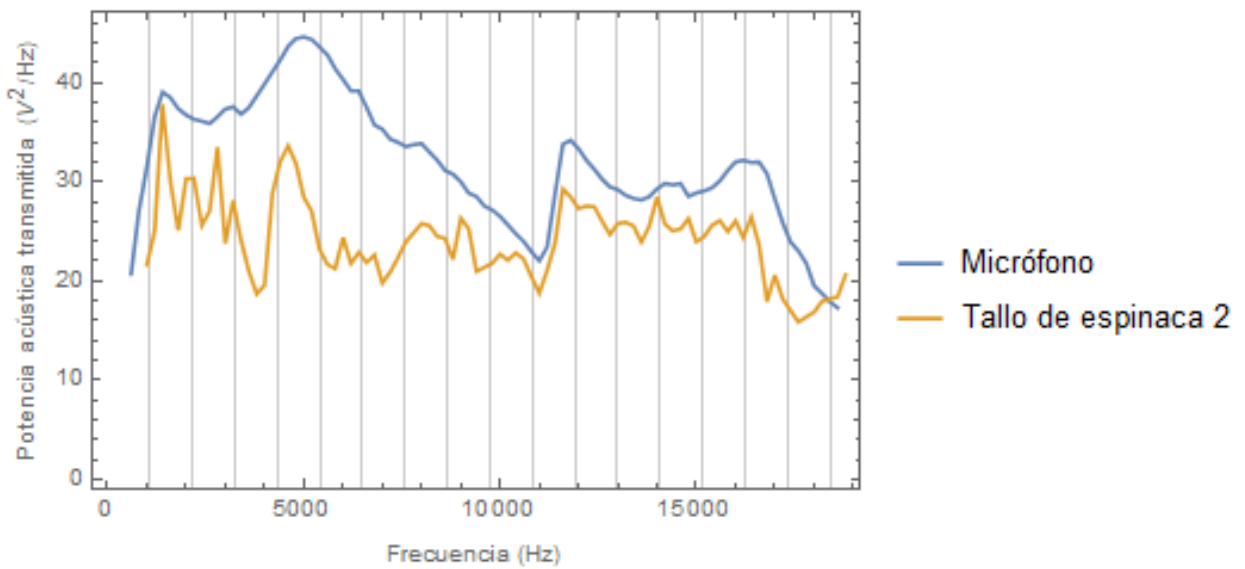


Ilustración 25. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 2 es de 1083 Hz.



- Tallo de espinaca 3

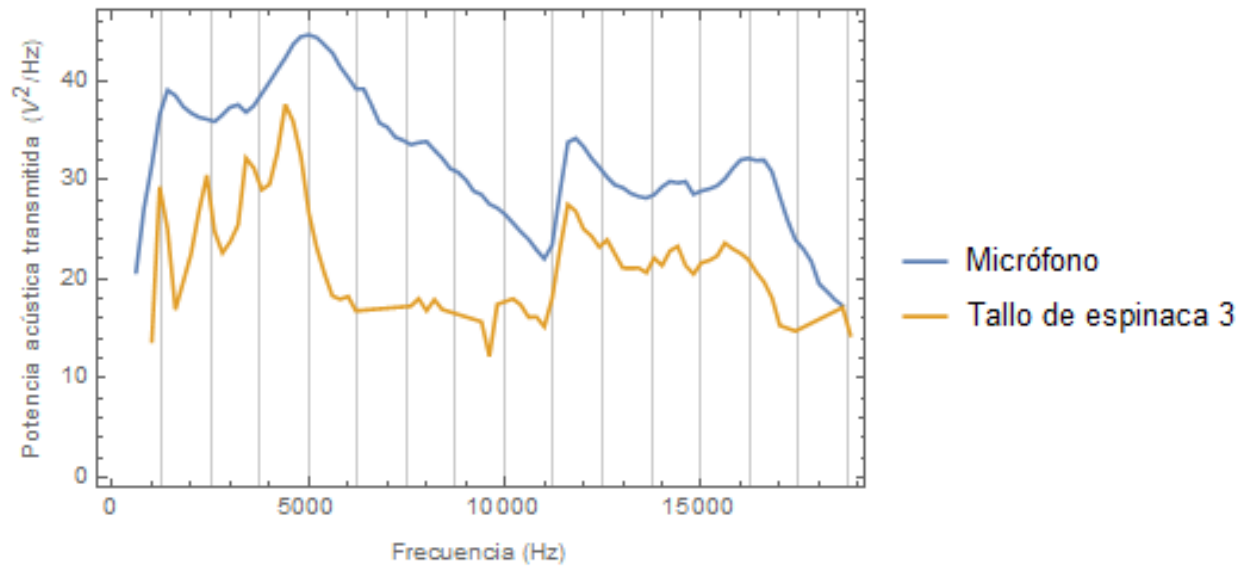


Ilustración 26. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 3 es de 1248 Hz

- Tallo de espinaca 4

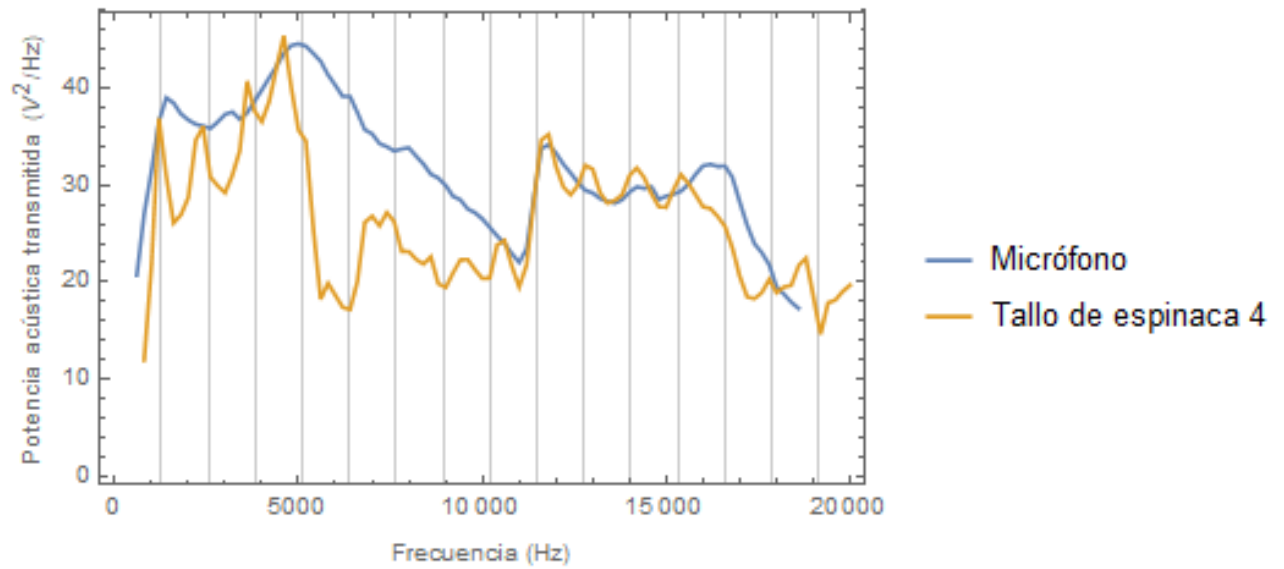


Ilustración 27. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 4 es de 1276 Hz

- Tallo de espinaca 5

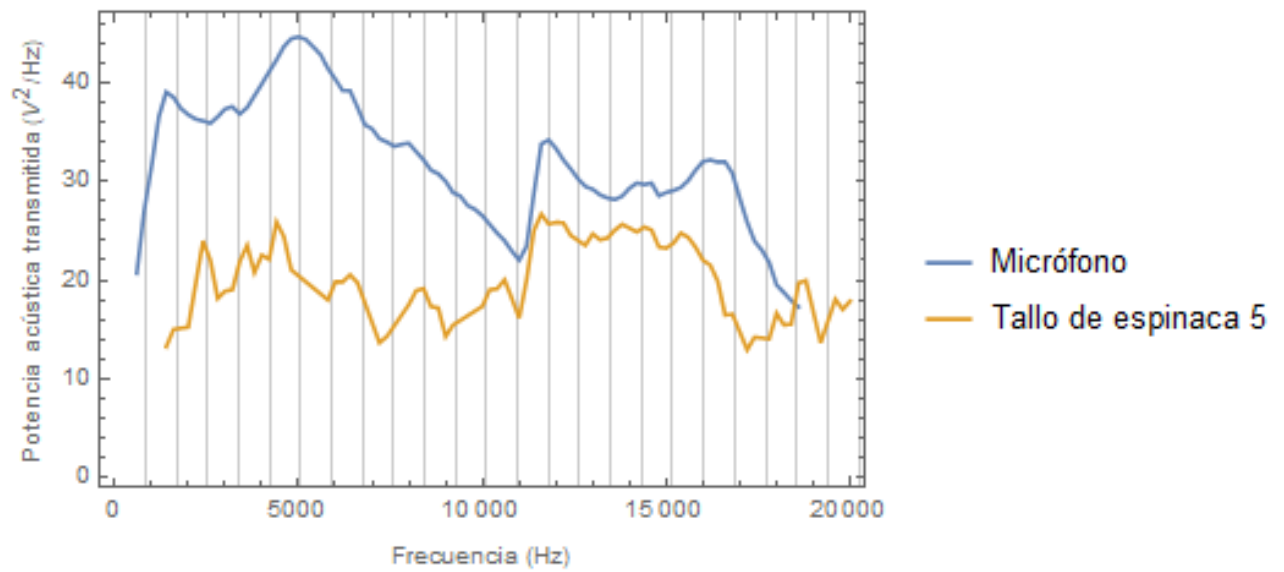
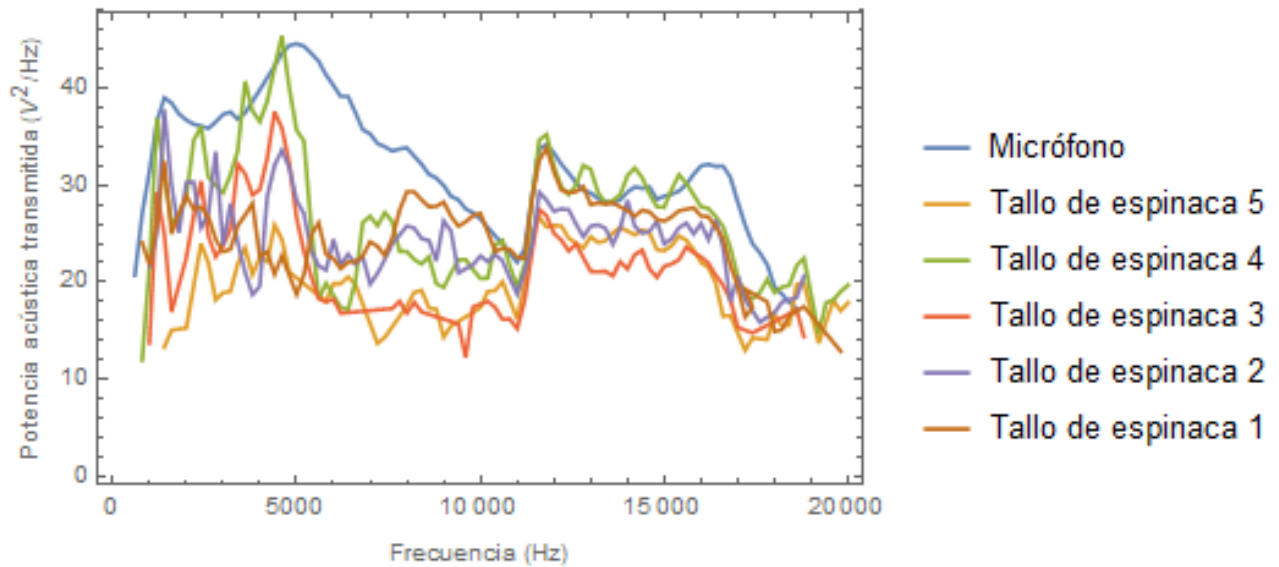


Ilustración 28. La frecuencia fundamental esperada para el tallo 5 es de 84 Hz

- Potencia acústica transmitida de tallos de espinaca



*Ilustración 29. Respuesta acústica de tallos cilíndricos de espinaca.*

Se observa que de forma general existe resonancia en los tallos, así como la presencia de algunos armónicos en algunas regiones de éstos.

Adicional a esto, se realizaron mediciones de potencia acústica transmitida de tallos de cebollín y apio para hacer una comparativa, ya que estos no presentan una morfología similar a los tallos de espinaca, sino más bien pudiesen representarse con un modelo de varillas.

Los resultados de potencia acústica transmitida como función de la frecuencia de éstos se presentan a continuación. Al presentar una respuesta de potencia acústica transmitida baja se optó por solo utilizar tallos de espinaca.

### **Tallos de cebollín**

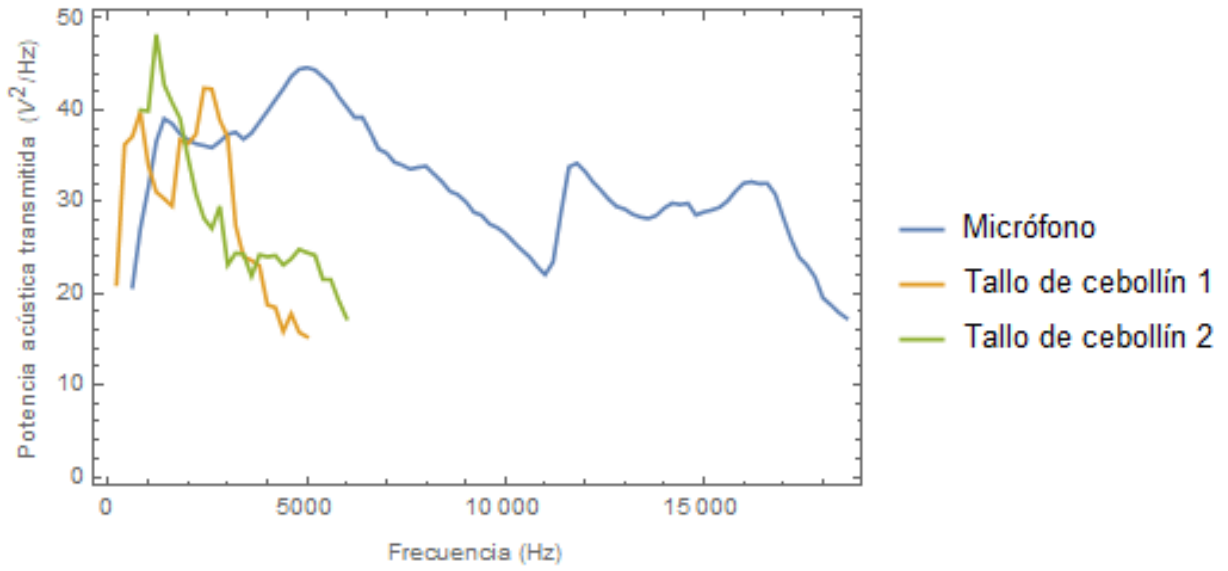


Ilustración 30. Respuesta acústica de tallos de cebollín.

### Tallo de apio

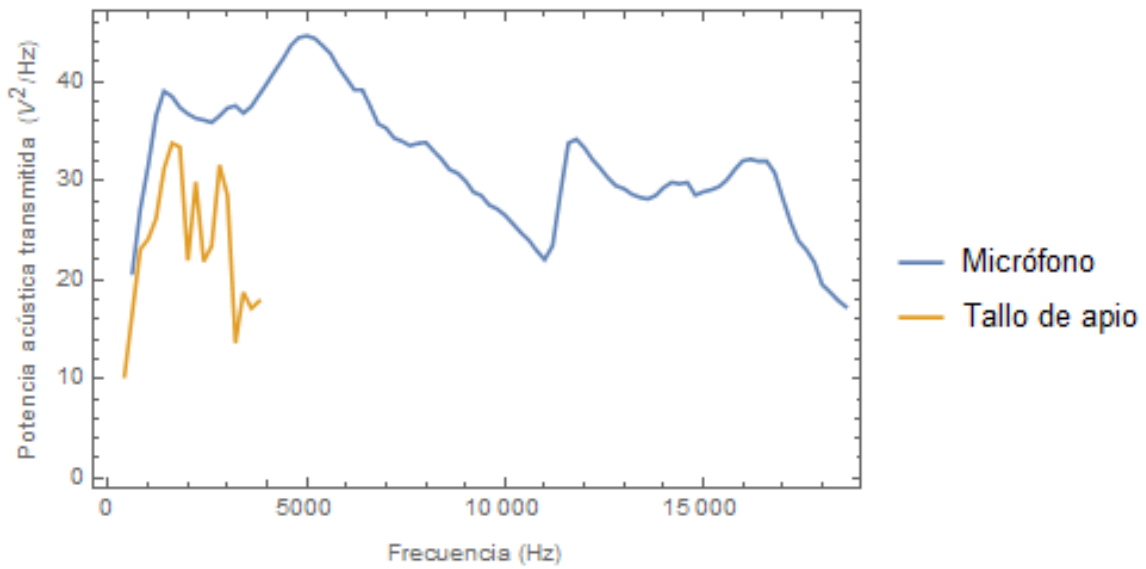


Ilustración 31. Respuesta acústica de apio.

#### **5.4. Medición de la potencia acústica transmitida de tallos de espinaca como función del tiempo.**

Una vez establecido el tipo de tallo a utilizar (espinaca) se optó por estandarizar la metodología implementada, es decir, repetir el experimento bajo condiciones uniformes.

La longitud de los tallos fue de 13.5 cm, su diámetro aproximado es de 0.4 cm, por lo que su frecuencia fundamental será de 1248 Hz.

Se realizaron mediciones cada 2 horas del mismo tallo, el procedimiento experimental fue el mismo que se describió anteriormente.

Adicionalmente se realizó una cámara de espuma acústica de poliuretano de la marca Quick Life Buy, con una densidad de  $20\text{kg}/\text{m}^3$  un espesor de 25 mm, para aislar el sistema de posibles ruidos exteriores, el montaje experimental, así como el interior de la cámara de aislamiento acústico es como se muestra en las ilustraciones 22 y 23.

Aunado a esto, se tomó un registro de temperatura y porcentaje de humedad al momento de realizar las mediciones, las cuales fueron medidas con un hygro – thermometer clock marca extech. Los valores obtenidos son los que se describen en la siguiente tabla.

	<b>Medición I</b>		<b>Medición II</b>		<b>Medición III</b>	
<b>Tallo</b>	<b>T. (°C)</b>	<b>%H</b>	<b>T. (°C)</b>	<b>%H</b>	<b>T(°C)</b>	<b>%H</b>
<b>Alfa</b>						
<b>Beta</b>						
<b>Gamma</b>	25.2	35	25.6	35	25.8	33
<b>Delta</b>	24.9	36	25.3	33		
<b>Épsilon</b>	24.1	36	24.6	36	24.8	36
<b>Zeta</b>						
<b>Eta</b>	24.5	38	25.1	36	25.5	35
<b>Theta</b>	24.5	38	25.0	37	25.4	36
<b>Iota</b>	24.9	38	25.4	38	25.4	38
<b>Kappa</b>	23.5	42	24.0	40	24.3	40
<b>Lambda</b>	25.8	40	26.1	40	26.4	39
<b>Mu</b>	26.1	40	26.7	40	27	38
<b>Un</b>	25.5	41	25.9	40	26.3	40
<b>Xi</b>	25.6	41	26.4	38	26.9	37
<b>Ómicron</b>	26.0	40	27.0	38	27.2	38

*3. Condiciones de temperatura y humedad al momento de realizar las respectivas mediciones.*

Los resultados obtenidos para los tallos medidos son los que se presentan a continuación:

- Tallo alfa

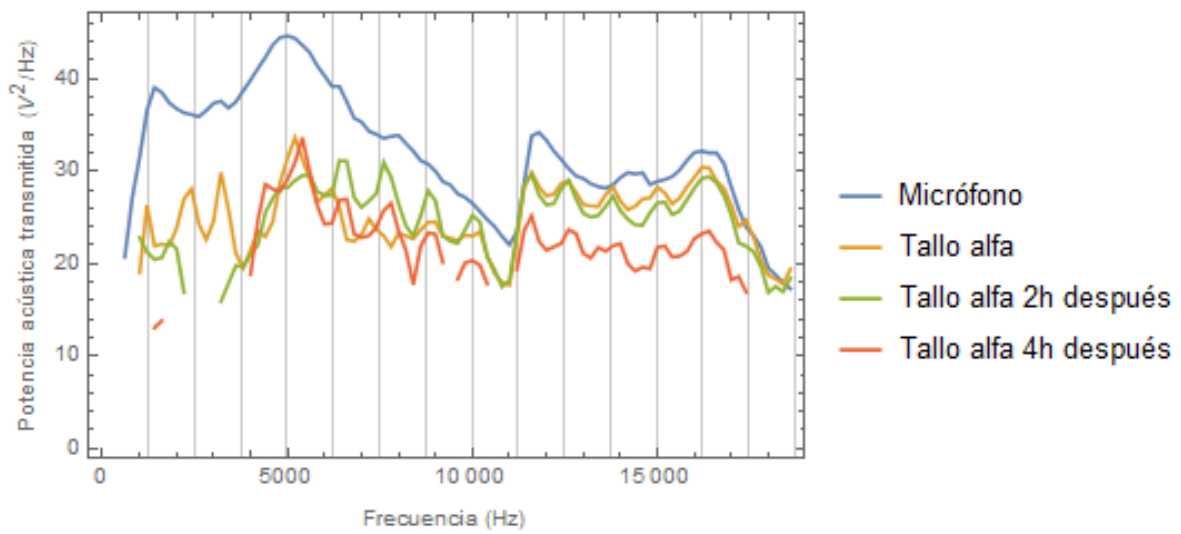


Ilustración 32. Respuesta acústica del tallo alfa.

- Tallo beta

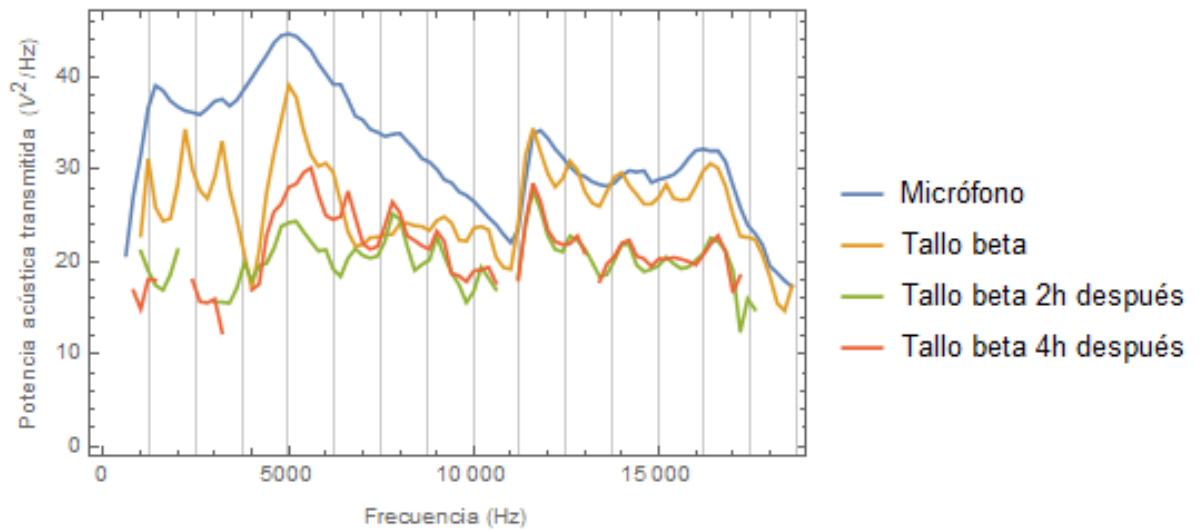


Ilustración 33. Respuesta acústica del tallo beta.

- Tallo gamma

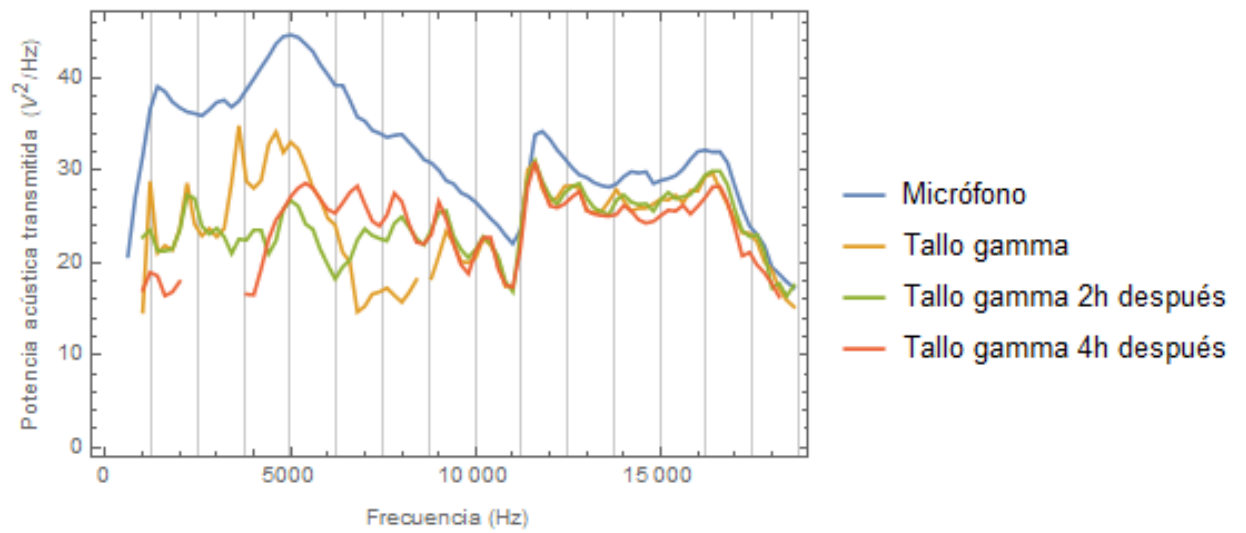


Ilustración 34. Respuesta acústica del tallo gamma.

- Tallo delta



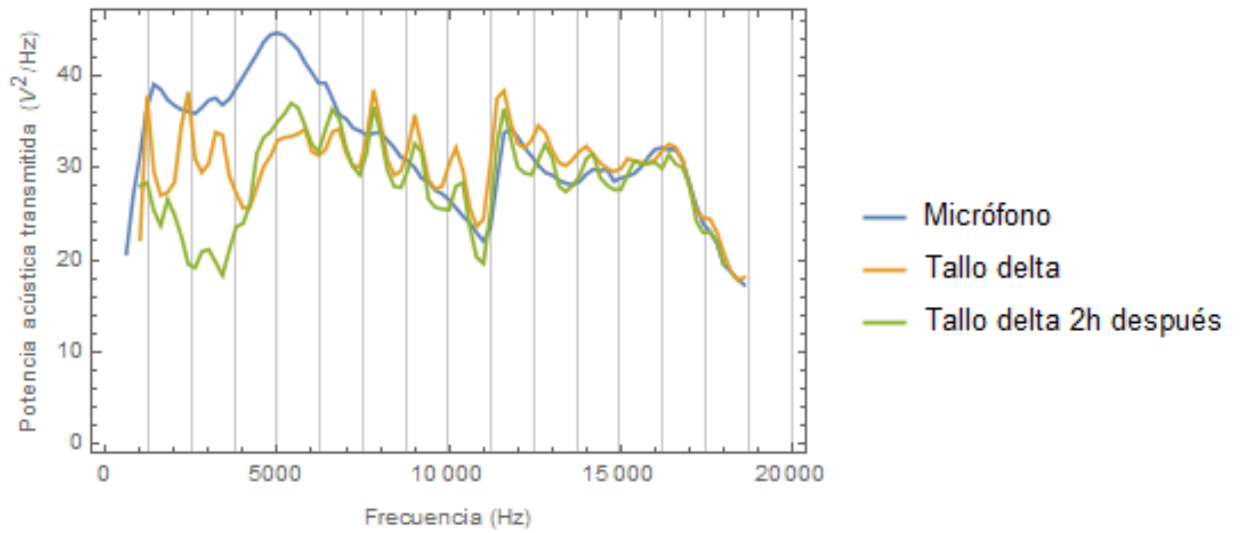


Ilustración 35. Respuesta acústica del tallo delta.

- Tallo épsilon

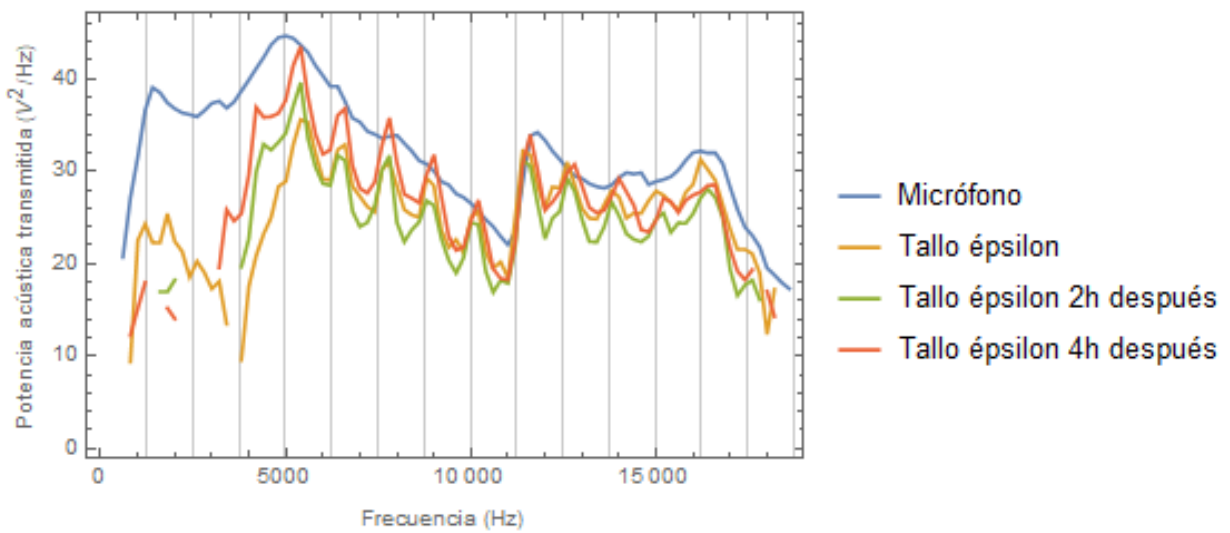


Ilustración 36. Respuesta acústica del tallo épsilon.

- Tallo zeta

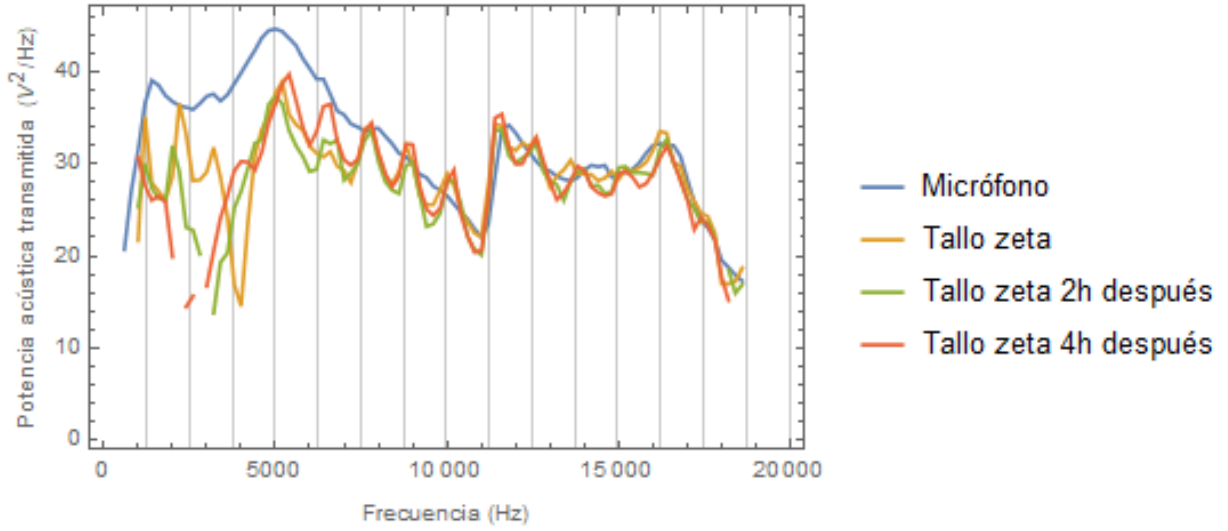


Ilustración 37. Respuesta acústica del tallo zeta.

- Tallo eta

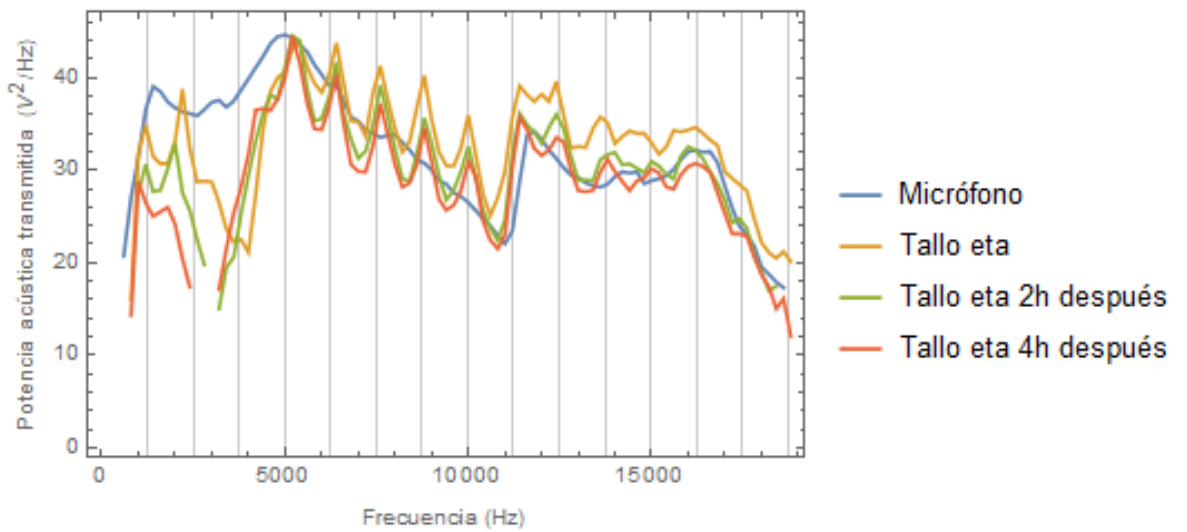


Ilustración 38. Respuesta acústica del tallo eta.

- Tallo theta

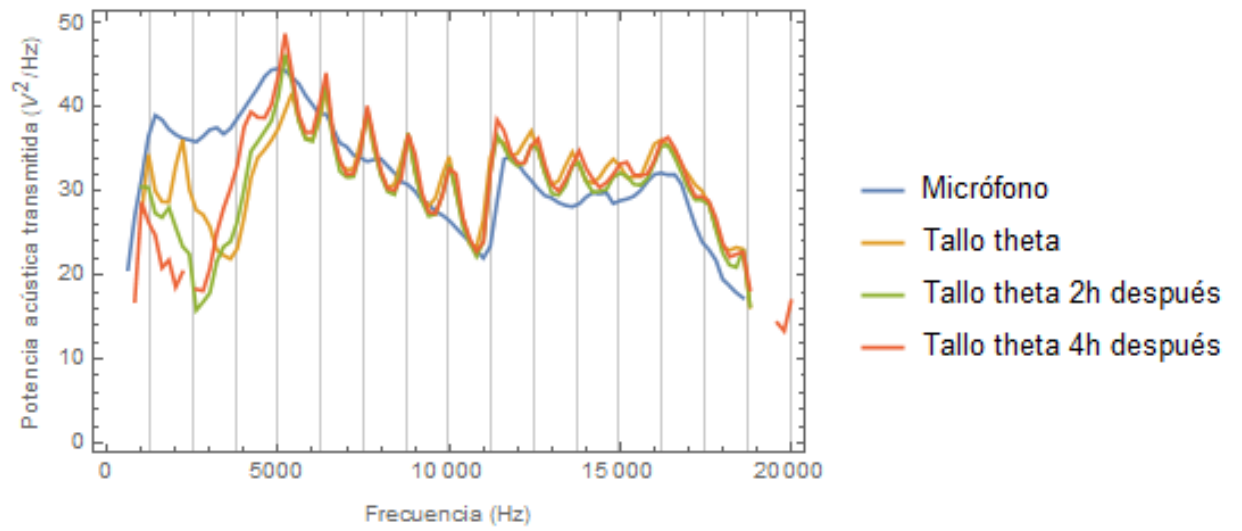


Ilustración 39. Respuesta acústica del tallo theta.

- Tallo iota

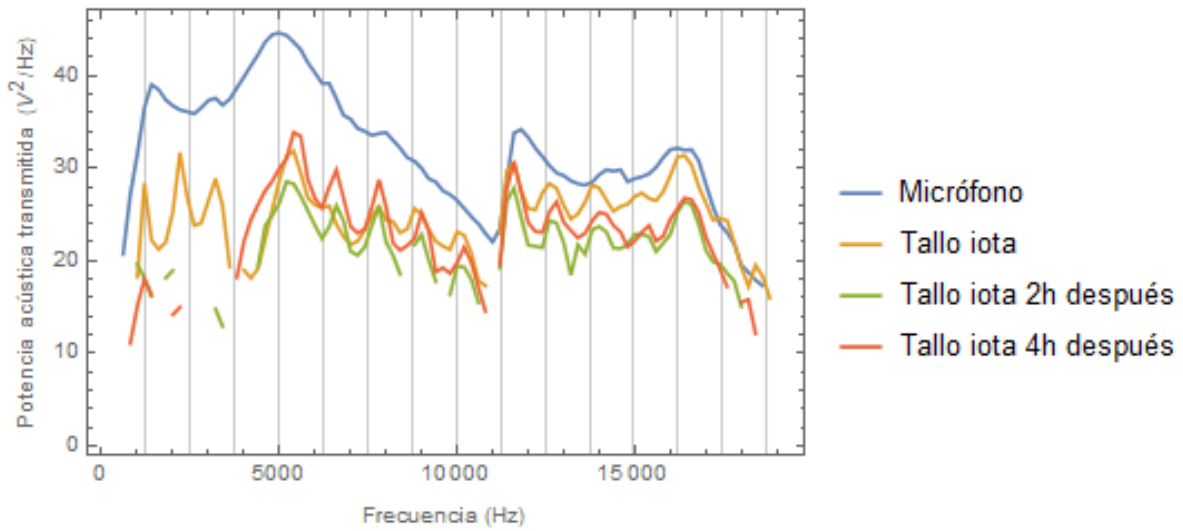


Ilustración 40. Respuesta acústica del tallo iota.

- Tallo kappa

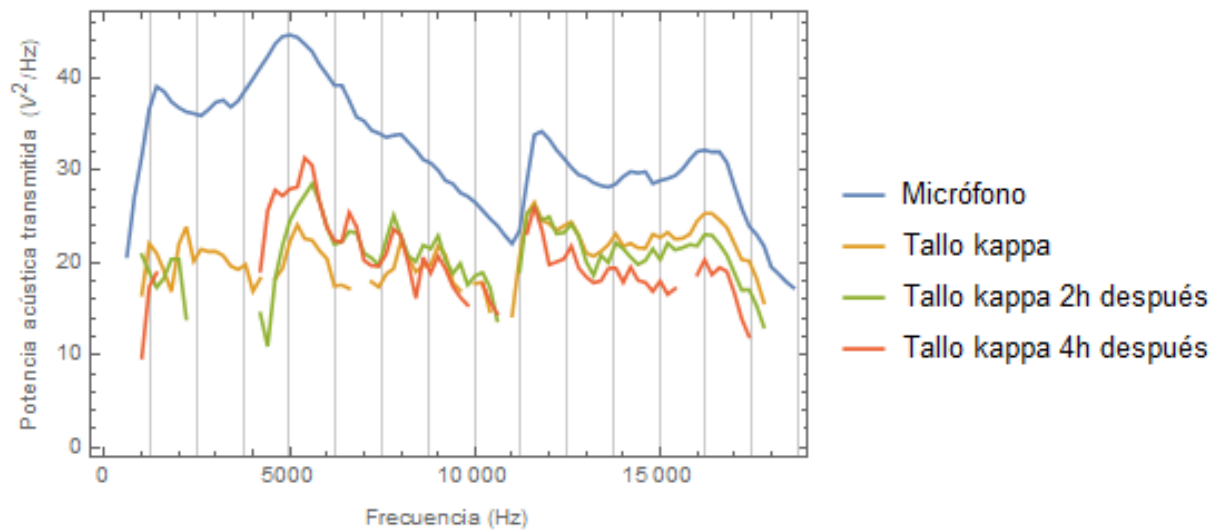


Ilustración 41. Respuesta acústica del tallo kappa.

- Tallo lambda

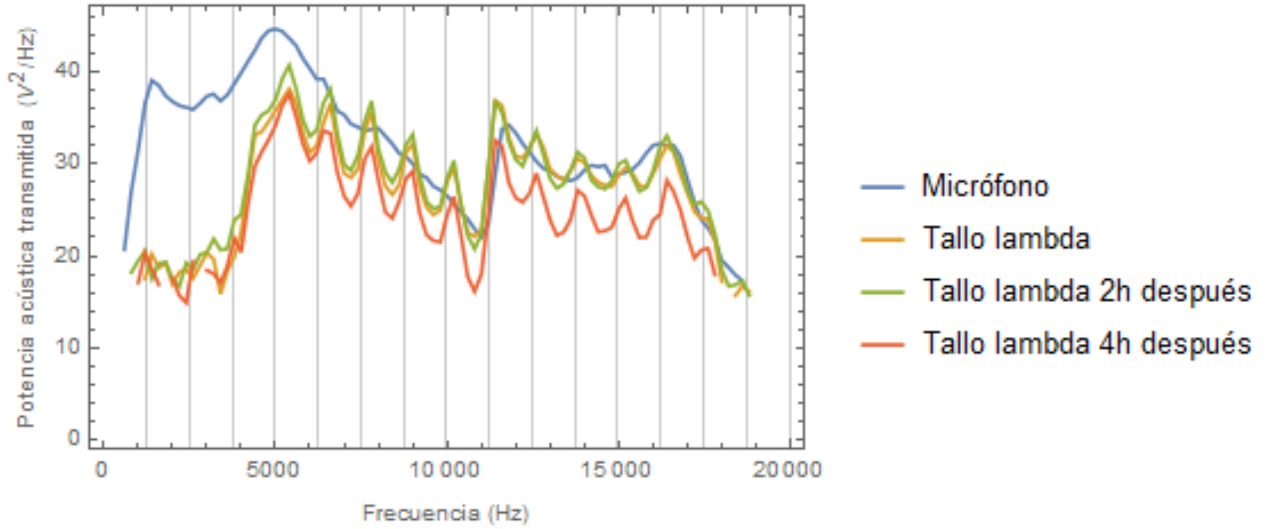


Ilustración 42. Respuesta acústica del tallo lambda.

- Tallo mu

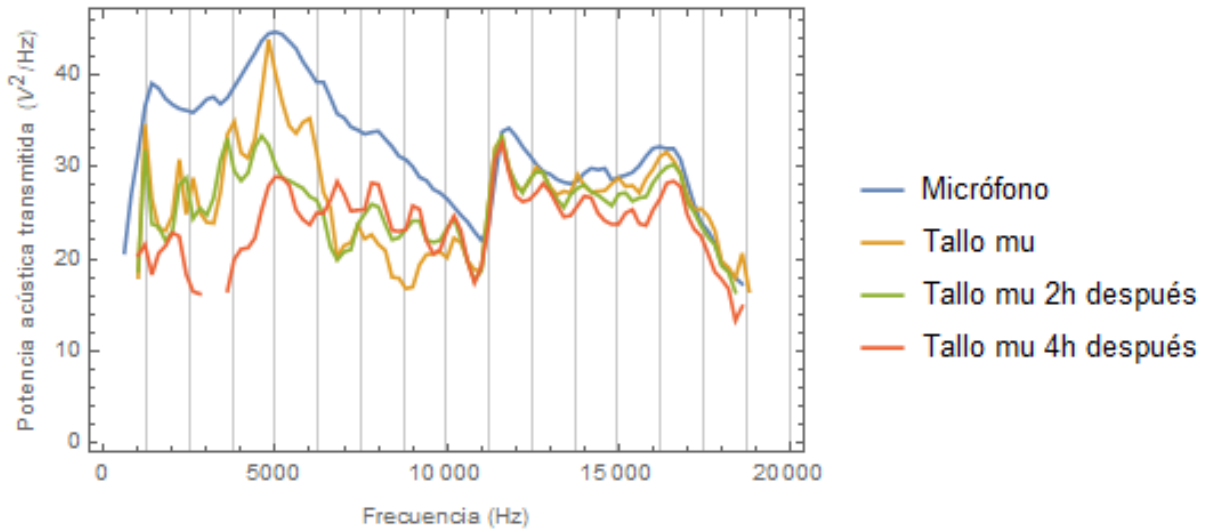


Ilustración 43. Respuesta acústica del tallo mu.

- Tallo nu

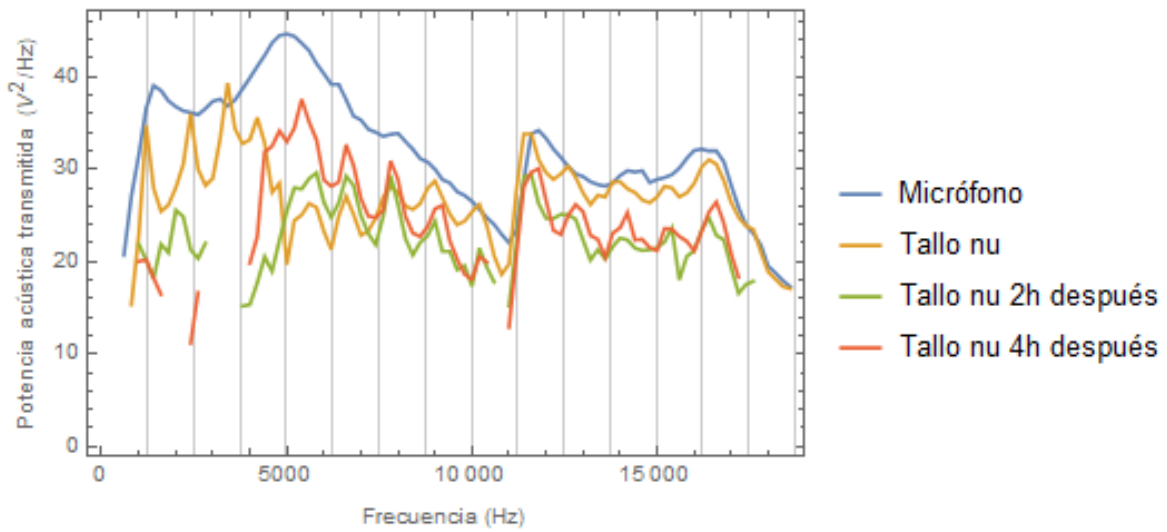


Ilustración 44. Respuesta acústica del tallo nu.

- Tallo xi

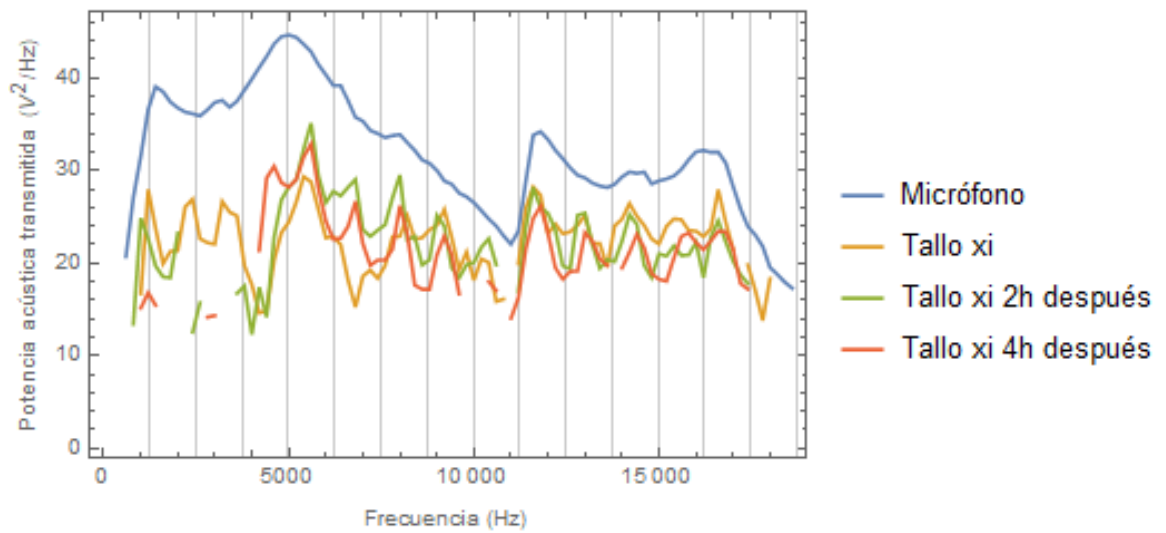
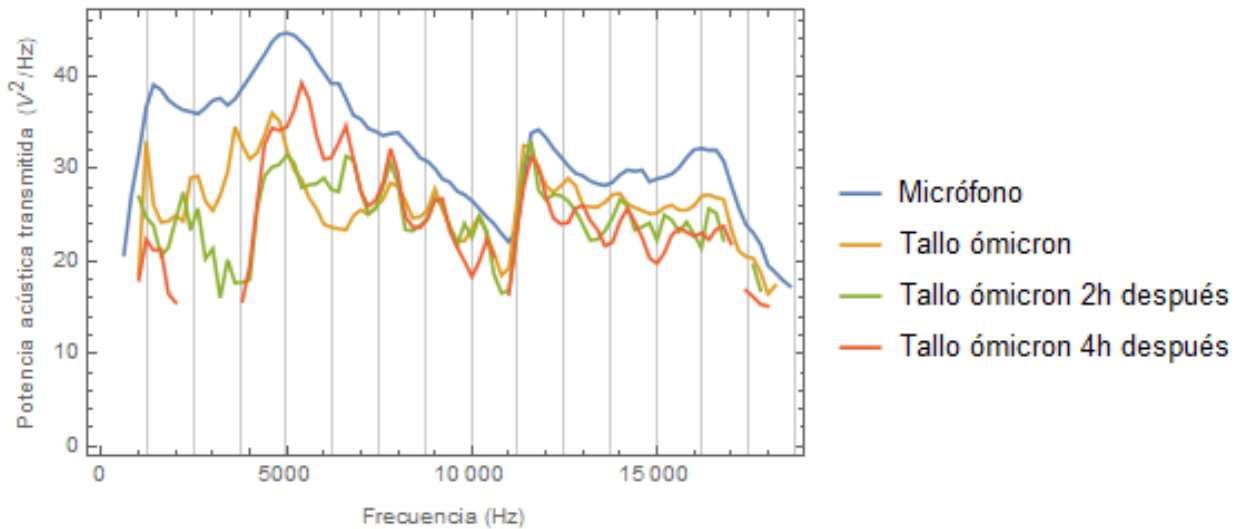


Ilustración 45. Respuesta acústica del tallo xi.

- Tallo ómicron



*Ilustración 46. Respuesta acústica del tallo ómicron.*

Podemos resumir los resultados obtenidos de la siguiente manera:

Los tallos de espinaca presentan un comportamiento acústico similar al de los tubos cilíndricos ya que teóricamente coinciden los valores de frecuencias de resonancia, frecuencia fundamental y armónicos con los obtenidos para un tubo de estas dimensiones.

Después de un periodo de dos horas en los gráficos de potencia acústica transmitida como función de la frecuencia se observan decrementos en el intervalo de frecuencias que va de los 1000 a 5000 Hz aproximadamente.

Para algunos casos después de un periodo de dos horas en los gráficos de potencia acústica transmitida como función de la frecuencia se observan incrementos en el intervalo de frecuencias que va de los 6000 a 11000 Hz aproximadamente.

Se observa una respuesta de potencia acústica transmitida baja en el intervalo de frecuencias que va de los 6000 a 11000 Hz aproximadamente.

## 5.5 Observaciones de la morfología del tallo de espinaca durante periodos de tiempo.

Adicional a los resultados presentados en la sección anterior, para determinar la morfología del tejido de la pared de los tallos, así como los cambios en estos al pasar el tiempo, se realizó la siguiente captura de imágenes.

- Toma de imágenes por microscopía estereoscópica.

Se utilizó un microscopio estereoscópico el cual fue proporcionado por el laboratorio 8 del edificio alfa, marca Nikon modelo SMZ645 para obtener imágenes de la sección transversal del tallo, así como de la pared interna de este, las imágenes obtenidas se capturaron con ayuda de la cámara de un teléfono celular.

La toma de imágenes, para la sección transversal y la pared interna del tallo se realizó cada dos hora, se registraron las condiciones de humedad y temperatura al momento de realizar la captura de imágenes.

### **Microscopio estereoscópico** Tomado de (Matt Carter, 2015)

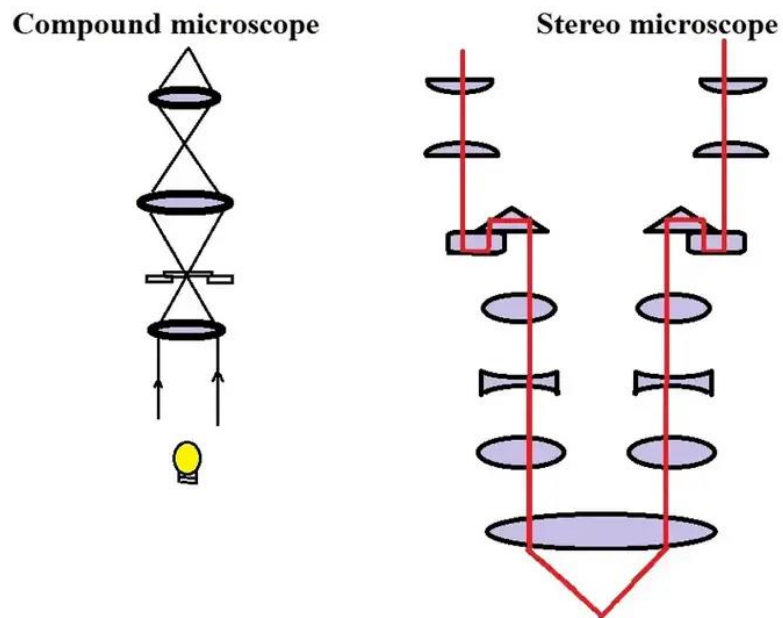
También conocido como microscopio de disección, es un microscopio óptico, la diferencia con el microscopio compuesto es la siguiente: en un microscopio óptico compuesto la luz pasa a través de un solo objetivo y sistema de lentes, mientras que en el microscopio estereoscópico pasa a través de dos sistemas de lentes separados, la luz se dirige a cada ojo desde dos caminos ópticos independientes, por lo que la luz de un solo punto de nuestra muestra viaja a



través de dos caminos distintos, lo que da un aspecto de tridimensionalidad a la muestra.

Los microscopios de disección utilizan la luz que se refleja en una muestra, mientras que los microscopios compuestos usan la luz que se transmite a través de ésta, por lo que las muestras deben ser lo suficientemente delgadas para permitir el paso de luz.

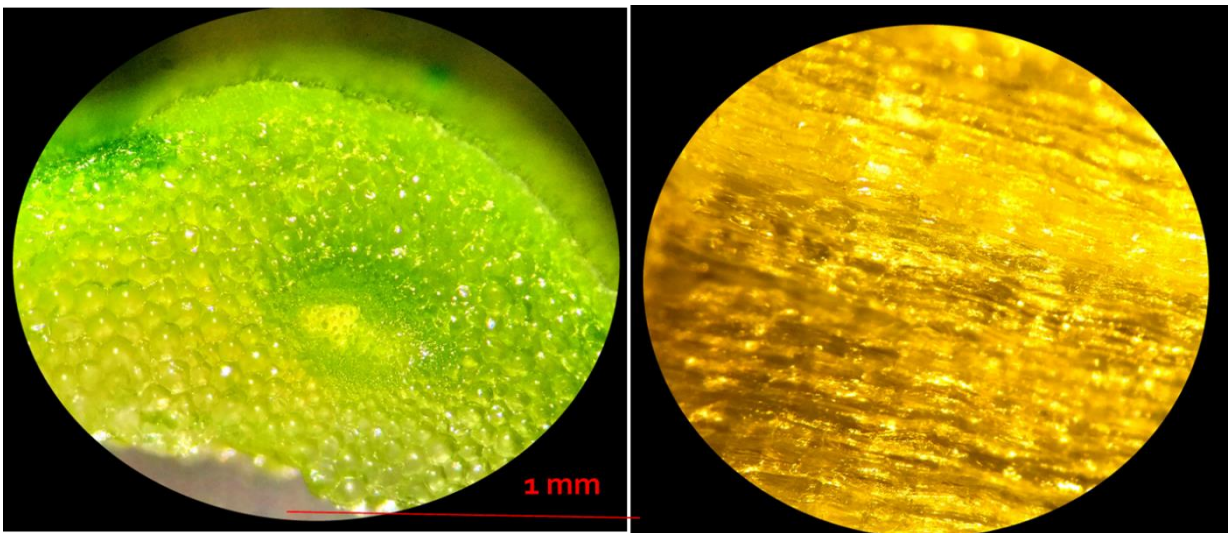
Además, el aumento para cada uno de estos suele ser distinto, siendo el microscopio estereoscópico útil para examinar estructuras macroscópicas.



*Ilustración 47. Diagrama que representa la diferencia entre el arreglo óptico de un microscopio compuesto y un microscopio de disección o estereoscópico. Tomada de <https://www.microscopemaster.com/>*

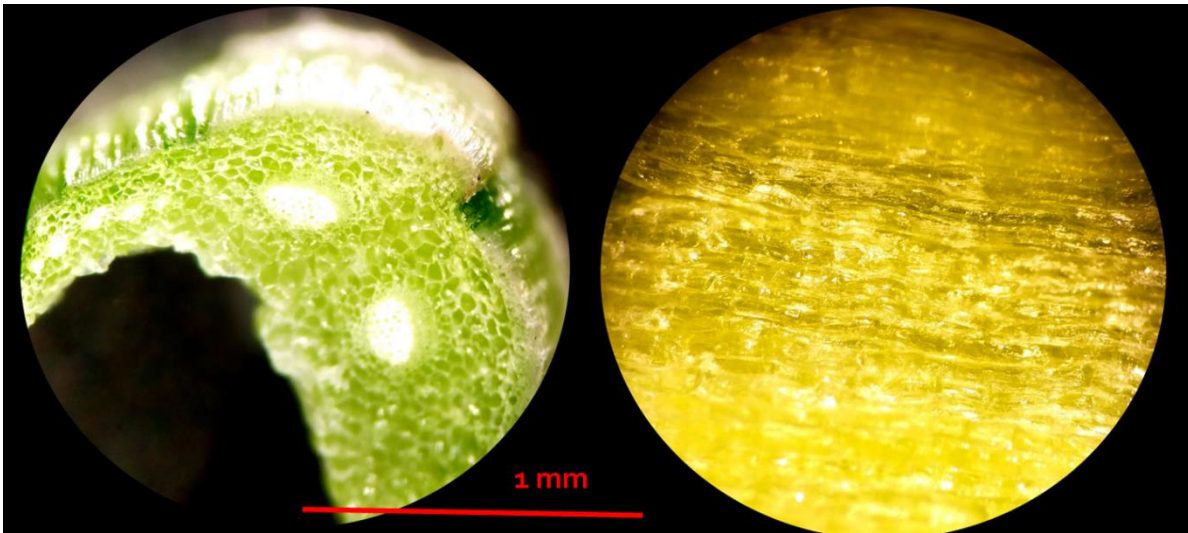
Se obtuvieron los siguientes resultados:

- Medición inicial de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas



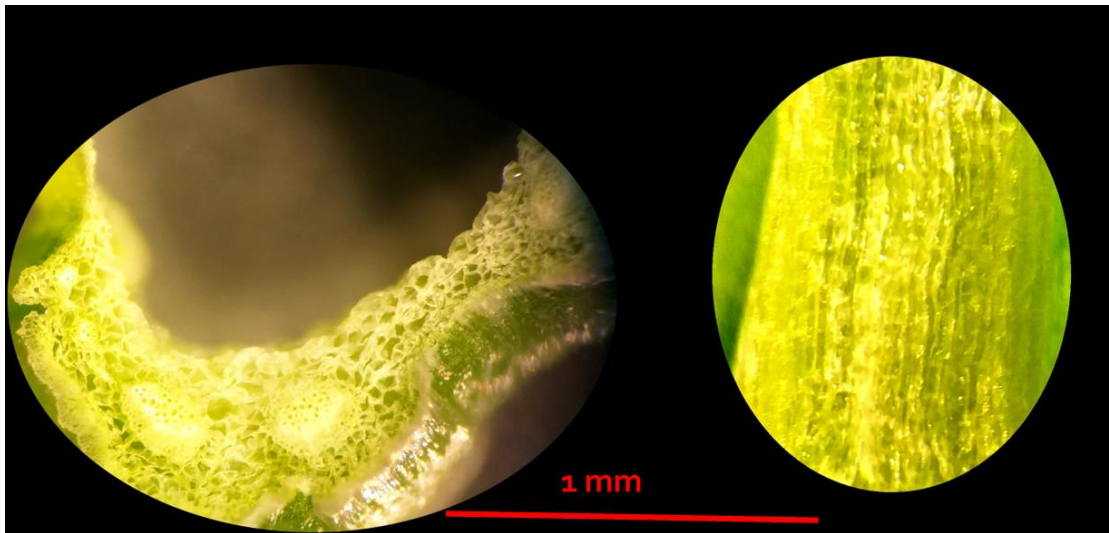
*Ilustración 48. Imagen tomada por microscopía estereoscópica de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas*

- Medición de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas dos horas después.



*Ilustración 49. Imagen tomada por microscopía estereoscópica de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas dos horas después*

- Medición de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas cuatro horas después.



*Ilustración 50. Imagen tomada por microscopía estereoscópica de la sección transversal y la pared interna de un tallo de espinacas 4 horas después*

Las condiciones de temperatura y humedad al momento de realizar la toma de imágenes fueron las siguientes:

Medición I		Medición II		Medición III	
T. (°C)	%H	T. (°C)	%H	T(°C)	%H
25.5	30	25.6	29	26.0	27

*4. Condiciones de temperatura y humedad al realizar la toma de imágenes*

Las imágenes obtenidas muestran la pérdida de agua en el tejido del tallo al pasar el tiempo, así como la disminución de la longitud del espesor de la pared del tallo.

## 6. Conclusiones

Fue posible implementar un esquema experimental para determinar las propiedades acústicas de tallos de espinaca y tubos metálicos, por medio del cual se desarrolla el proyecto expuesto a lo largo de este documento.

Como validación a este método se encontraron las frecuencias de resonancia, la frecuencia fundamental y los respectivos armónicos de tres tubos metálicos de aluminio de diferentes longitudes.

Para la curva de potencia acústica transmitida de estos tubos metálicos, se obtuvieron valores similares de frecuencia fundamental y resonancias acústicas a los calculados de forma teórica.

Se encontró la curva de potencia acústica transmitida de tallos de espinaca, por medio de esta se logró el objetivo principal de este trabajo de tesis, el cual es determinar las frecuencias de resonancia acústica, la frecuencia fundamental y los respectivos armónicos de tallos cilíndricos de espinaca.

Podemos inferir que la hipótesis expuesta en este documento, la cual nos dice que los tallos de espinaca tienen un comportamiento acústico similar al de tubos cilíndricos queda confirmada, ya que teóricamente coinciden los valores de frecuencias de resonancia, frecuencia fundamental y armónicos con los obtenidos para un tubo de estas dimensiones.

Se encontró que después de un periodo de dos horas en los gráficos de potencia acústica transmitida de los tallos de espinaca como función de la frecuencia se observan decrementos en el intervalo de frecuencias que va de los 1000 a 5000 Hz aproximadamente.

Del mismo modo para algunos casos después de un periodo de dos horas en los gráficos de potencia acústica transmitida de los tallos de espinaca como función de la frecuencia se observan incrementos en el intervalo de frecuencias que va de los 6000 a 11000 Hz aproximadamente.

Se observa una respuesta de potencia acústica transmitida de tallos de espinaca baja en el intervalo de frecuencias que va de los 6000 a 11000 Hz aproximadamente.

Finalmente, de las imágenes obtenidas durante periodos de tiempo que corresponden a los utilizados para determinar los cambios en la potencia acústica transmitida en los tallos, se observa un decremento del agua en las paredes del tejido, así como también una disminución en el grosor de las paredes del tallo.

## 7. Perspectivas

Como se menciona en las conclusiones expuestas en este proyecto, para algunos casos, en los gráficos de potencia acústica transmitida de los tallos de espinaca se observan comportamientos como incrementos o decrementos en intervalos de frecuencias como función del tiempo.

Aún no es posible deducir la causa de este comportamiento; sin embargo, podemos especular que al transcurrir el tiempo el tallo pasa por un proceso de deshidratación lo cual repercute en las propiedades físicas de la pared del tejido de éste.

Para investigar el papel que tiene la morfología de la pared del tallo, se podría buscar alguna manera de secar el tallo de espinaca sin que pierda su forma original y observar cómo repercute el agua de la pared del tejido del tallo en las propiedades acústicas de este material.

Así mismo se podrían determinar las propiedades acústicas de otros tipos de tallos que sean similares a los tallos de espinaca, es decir, huecos y de forma cilíndrica. Con esto podríamos saber si el comportamiento de estos tallos es similar al comportamiento de los tallos de espinaca; es decir, si en éstos también existen regiones de frecuencias con incrementos o decrementos como función del tiempo. Lo cual nos daría más información sobre la propagación acústica este tipo de sistemas.

Finalmente, el saber cómo determinar las propiedades acústicas de los tallos de las plantas podría abrir la posibilidad de aplicar tratamientos acústicos a algunos cultivos agrícolas de interés con el fin de realizar pruebas y buscar alguna mejora en estos, ya sea una germinación de semillas más eficaz, un crecimiento óptimo de las plantas, entre otros.

## 8. Referencias

- Ayuhō Uchida, K. T. (2002). Effects of Mechanical Vibration on Seed Germination of *Arabidopsis thaliana*. *Plant Cell Physiol*, 647-651.
- Bernhardt H. Edskes, D. T. (2022). Tone generation in an open-end organ pipe: How a resonating sphere of air stops the pipe. *arXiv preprint arXiv:2203.15042*.
- Daniel Merenich, K. E.-B. (2022). Chapter 18 - Advanced microscopy techniques for the visualization and analysis of cell behaviors. En *Cell Movement in Health and Disease* (págs. 303-321). Academic Press, ISBN 9780323901956.
- Emiel Van Kooten, M. S. (2019). Nyquist-Shannon sampling theorem. *Leiden University*, vol.1, No. 1.
- H. M. Appel, R. B. (2014). Plants respond to leaf vibrations caused by insect herbivore chewing. *Oecologia*, 1257-1266.
- Hickman, I. (1995). *Oscilloscopes how to use them, how they work*. Oxford: Elsevier .
- Jaffe, M. (1973). Thigmomorphogenesis : The Response of Plant Growth and Development to Mechanical Stimulation With Special Reference to *Bryonia Dioica* . *Springer*, 143-157.
- James J. Licari, D. W. (2011). *Adhesives Technology for Electronic Applications*. Elsevier.



- José Antonio Peralta, P. R. (2009). El fenómeno de la resonancia. *Journal lapen*, 612-618.
- Katherine Creath, G. E. (2004). Measuring Effects of Music, Noise, and Healing Energy Using a Seed Germination Bioassay. *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, 113-122.
- Kuttrutt, H. (2007). *Acoustics, an introduction*. London and New York: Taylor & Francis Group.
- Lawrence E. Kinsler, A. R. (2000). *Fundamentals of Acoustics*. United States of America: John Wiley and Sons, Inc.
- Marine Veits, I. K.-D. (2019). Flowers respond to pollinator sound within minutes by increasing nectar sugar concentration. *Ecology Letters*, 1483-1492.
- Matt Carter, J. S. (2015). Guide to Research Techniques in Neuroscience. En *Microscopy* (págs. 118-143). Elsevier.
- Omar E. Olarte, J. A.-A. (2018). Light-sheet microscopy: a tutorial. *Advances in optics and photonics*, 111-179.
- Pawera, N. (2010). *Practical Recording Microphones 1*. London: smt.
- Schowengerdt, R. A. (1997). *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. Academic Press.
- Su Wang, Y. S. (2022). Effects of Sound Wave and Water Management on Growth and Cd Accumulation by Water Spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.). *Agronomy*.
- Thomas D. Rossing, N. H. (1995). *Principles of Vibration and Sound*. New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo, Hong Kong, Barcelona, Budapest: Springer-Verlag.
- Tohyama, M. (2020). Chapter 2 - Resonance systems. En M. Tohyama, *Acoustic Signals and Hearing* (págs. 25-46). Academic Press, ISBN 9780128163917.

Vicient, C. (2017). The effect of frequency-specific sound signals on the germination of maize seeds. *BMC Res Notas* 10, 323.

Willoughby, J. (2002). *Plant Engineer's Reference Book*. Elsevier.

Wolfe, J. (30 de mayo de 2023). *University of New South Wales*. "Acoustic impedance, intensity and power". Obtenido de <https://newt.phys.unsw.edu.au/>

Wolfe, J. (31 de mayo de 2023). . *University of New South Wales*. "Helmholtz Resonance". Obtenido de <https://newt.phys.unsw.edu.au/>

