

¿Cómo influye la intensidad de una nota musical en el timbre de esta?

Pseudónimo: Tacoma Narrows

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi tutora su paciencia y su asesoramiento a lo largo de la realización del trabajo. También me gustaría dar las gracias al conservatorio por ceder uno de sus espacios para poder realizar los experimentos. Finalmente, quiero agradecer a mi familia el apoyo recibido en todo momento.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento	3
1.2. Objetivos	4
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. Frecuencias, armónicos e instrumentos musicales	5
2.2. Intensidad sonora y nivel de intensidad sonora	6
2.3. Análisis del espectro sonoro	7
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	9
3.1. Metodología	9
3.2. Clasificación de variables.....	10
3.3. Diseño experimental.....	11
3.3.1. Material.....	11
3.3.2. Montaje.....	11
3.3.3. Procedimiento.....	12
4. RESULTADOS.....	14
4.1. Recolecta de datos.....	14
4.2. Tratamiento de datos	17
5. CONCLUSIONES	23
6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	25
7. ANEXOS	26
7.1. Gráficos: análisis de espectro sonoro	26
7.2. Gráficos: NIS de los 10 armónicos de la nota en función del NIS general de la frecuencia	34
7.3. Gráficos: pendiente m_1 de los 10 armónicos de cada nota en función de los 10 armónicos múltiples.....	38

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento

Hace ya muchos años que estudio música, y es por la pasión que siento por ese tema que he escogido realizar el trabajo de investigación relacionado con mi instrumento, el trombón. El trombón cuenta con un rango (tanto tonal como de intensidad sonora) muy amplio, es decir, que puede tocar notas muy agudas y muy graves, y también puede sonar muy flojo o muy alto. Su sonido también tiene un timbre único, como lo tienen todos los instrumentos, sean de viento, cuerda, percusión.... Esto es debido a que, al tocar una nota, a parte de la frecuencia de esta, en realidad están vibrando una serie de frecuencias secundarias llamadas armónicos. En cada instrumento, la proporción de estas “notas secundarias” es distinta, y por lo tanto un *la* tocado por un piano será distinto a un *la* tocado por un trombón.

Aun así, un instrumento musical es un objeto muy complejo, y por lo tanto no siempre suena exactamente igual. El paso previo a este trabajo fue darme cuenta que, al tocar una nota más o menos fuerte, a parte de la intensidad, el timbre de mi trombón cambiaba ligeramente, el sonido tenía “otro color”. Así pues, me dispuse a investigar si realmente existía una relación entre estos dos parámetros sonoros de mi instrumento.

También me pregunté si variaría esta relación si estudiase las mismas variables en un instrumento distinto al trombón. Como se apreciará, finalmente descarté esta última opción, ya que, además de las limitaciones físicas y temporales que suponía, al probar de realizar el estudio con el clarinete y el fagot, los resultados fueron demasiado inconcluyentes para ser incluidos en el trabajo. Además, esto me permitirá llegar a unas conclusiones más concretas y centradas.

Por último, también pensé que sería interesante comprobar si influye la frecuencia del sonido en la relación de la intensidad y el timbre del instrumento, es decir, si la relación que me disponía a estudiar cambiaba al tocar notas distintas.

Antes de entrar en el trabajo en sí, es importante formular una pregunta de investigación que resuma qué es lo que nos disponemos a estudiar, ya que

ayudará a saber en todo momento hacia dónde nos dirigimos. En mi caso, me planteo la siguiente pregunta, que incluye el objetivo principal:

¿Cómo influye la intensidad del sonido de una nota musical en el trombón en el timbre de esta?

1.2. Objetivos

A partir de la pregunta de investigación y los parámetros que interesan estudiar, se plantean varios objetivos que ayudarán a estructurar y dar dirección al trabajo:

(1)-Estudiar y cuantificar cómo cambian los niveles de sonido de los diferentes armónicos al variar la intensidad del sonido de la frecuencia.

(2)-Estudiar y cuantificar si los resultados se ven afectados si se utiliza una frecuencia distinta, por lo tanto, si las relaciones son las mismas en las diferentes notas.

(3)-Interpretar la causa y las consecuencias de estas variaciones a nivel práctico en el instrumento en cuestión.

2. MARCO TEÓRICO

Es importante, antes de empezar el estudio de forma práctica, esclarecer conceptos y las relaciones entre ellos. En este apartado voy a establecer definiciones para conceptos que se utilizarán a lo largo del trabajo, y también a explicar detalladamente su significado e importancia para el estudio.

2.1. Frecuencias, armónicos e instrumentos musicales

Como se sabe, el sonido transmitido a través del aire tiene forma de onda. Estas ondas siguen un movimiento armónico, haciendo que el espacio intermolecular se dilate y comprime. En acústica, llamamos frecuencia al número de ciclos de onda que se producen en un segundo¹. Así, una frecuencia de 100 Hz significará que, en 1 segundo, el aire se ha comprimido y dilatado 100 veces. Representando este fenómeno gráficamente en función del tiempo, conseguimos una serie sinusoidal (movimiento armónico). La longitud de onda, es decir, la distancia entre los inicios de ciclo, será inversamente proporcional a la frecuencia.

La frecuencia es también lo que las personas percibimos como el “registro” de las notas: una frecuencia baja es percibida como grave, y una frecuencia alta como aguda.

Por otro lado, un armónico de una frecuencia se define simplemente como un múltiplo de la frecuencia fundamental. Es decir, si tenemos una frecuencia fundamental F , su segundo armónico será $2F$, su tercer armónico, $3F$... I así sucesivamente. Por lo tanto, la longitud de onda del segundo armónico será la mitad de la longitud de onda de la frecuencia fundamental, la del tercero será una tercera parte, y así infinitamente¹.

¹ Moser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería acústica: teoría y aplicaciones* (2da ed.). Springer

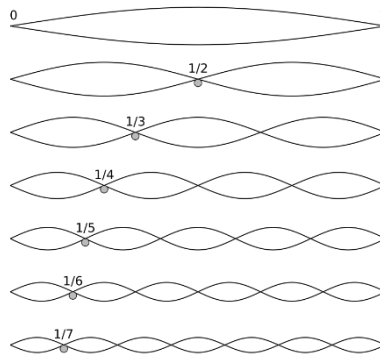


Figura 1. Representación de una frecuencia y sus 7 primeros armónicos. Fuente: Wikimedia.org.

Al generar un sonido, sea con un instrumento, nuestras cuerdas vocales o de cualquier otra forma, es casi imposible producir una frecuencia completamente pura: además de la frecuencia principal o fundamental, suenan algunos de sus armónicos². Si se toca un Si b 3 con el trombón, no solo sonará la frecuencia estricta del Si b 3, que es $f=233,1 \text{ Hz}$ ³, sino que también sonarán las frecuencias $2f=466,2 \text{ Hz}$, $3f=699,3 \text{ Hz}$... Este hecho es lo que proporciona la característica timbrística al sonido de los instrumentos. Un La4 ($440,0 \text{ Hz}$ ³) tocado por un piano o por un violín se pueden distinguir, suenan distinto, y eso es debido a que la proporción de los armónicos que suenan junto a la frecuencia fundamental de $440,0 \text{ Hz}$ son distintos en los dos casos.

2.2. Intensidad sonora y nivel de intensidad sonora

La intensidad de un sonido hace referencia a lo “ruidoso” que es éste, y es directamente proporcional a la amplitud de la onda. La intensidad se define como la cantidad de Energía transmitida en un periodo de tiempo por unidad de superficie⁴. Así pues, se representa con la siguiente expresión:

$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S} \quad \left(\frac{J}{s \cdot m^2} \right)$$

² Wolfe, J. (19 de septiembre de 2021) . *How harmonic are “harmonics”?* School of Physics, The University of South Wales.

³ Ciudad Pentagrama. (25 de septiembre de 2021). *Tabla de las frecuencias de las notas musicales.*

⁴ McCormick, T., & Rumsey, F. (2004). *Sonido y grabación. Introducción a las técnicas sonoras* (2da ed.). Instituto Oficial de radio y televisión, RTVE.

Sabiendo que $\frac{E}{\Delta t} = P$, donde P es potencia y tiene unidades de *Watts*, encontramos esta expresión:

$$I = \frac{P}{S} \quad \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Aun así, al hablar de intensidad de sonido, se suele utilizar una escala distinta: la decibélica. El principio en que se basa la escala decibélica es en cuantificar la “sensación sonora” que percibimos los humanos: el nivel de intensidad sonora que las ondas de sonido producen en los tímpanos. La forma en que nuestras oídos perciben un sonido es más parecida a una escala logarítmica que a una lineal. Un clásico ejemplo práctico es que no percibimos el sonido de 2 altavoces como el doble de intenso que el de 1 altavoz solo.

El Nivel de Intensidad Sonora (NIS) se puede describir con la siguiente expresión¹ :

$$\beta = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (dB)$$

Donde I es la intensidad sonora en cuestión y I_0 es la intensidad sonora mínima que puede percibir el oído humano, que es aproximadamente $I_0 \approx 10^{-12} W/m^2$

De este modo, los 0 dB se establecen en el umbral de percepción (porque $\log_{10}(1) = 0$), cada 10 dB la intensidad aumentará un factor de 10 (un aumento de 70 dB significará que la intensidad ha aumentado $10^7 W/m^2$).

2.3. Análisis del espectro sonoro

Como hemos detallado en el apartado 2.1., los sonidos producidos por los instrumentos no son frecuencias puras sino mezclas de la frecuencia fundamental con sus armónicos. Recordando el objetivo de este trabajo, pues, deberemos encontrar un sistema que nos permita separar, de esta mezcla, los distintos armónicos que la conforman, y a su vez cuantificar en qué proporción. Existe un algoritmo que hace exactamente esto, llamado *Fast Fourier Transform* (FFT), que coge la forma de la onda mezclada y determina cual es la suma de ondas que más se aproxima a ella. A su vez, debe determinar la amplitud de

¹ Moser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería acústica: teoría y aplicaciones* (2da ed.). Springer

esta, ya que también influye en la forma, y finalmente el NIS de cada armónico. Este proceso es llamado **análisis del espectro sonoro**:⁴

Audacity es un programa informático de edición de sonido que lleva incorporado el algoritmo de FFT, y que por lo tanto nos permitirá determinar qué armónicos están sonando y a qué nivel de intensidad sonora lo hacen. Aun así, se debe tener en cuenta que las unidades en que se da el nivel de intensidad sonora no son los decibelios (*dB*) estudiados en el apartado anterior, sino **decibelios a escala completa** (*dBFS*). Se utiliza esta escala debido a que, como hemos dicho, los decibelios sirven como referencia al oído humano, y al transmitir el mismo sonido a través de un receptor electrónico, su percepción puede cambiar.

El funcionamiento de la escala completa es el siguiente:⁴ cada dispositivo tiene un nivel de intensidad sonora límite, una barrera de decibelios que ya no puede captar. En la escala completa, este valor se convierte en la referencia, 0 *dBFS*. Todos los valores se formarán a partir de cómo de alejados están de este límite: así pues, todos los valores serán negativos, porque estarán por debajo del umbral. Por ejemplo: si encontramos que uno de los armónicos suena a -6 *dBFS*, significa que suena 6 *dB* por debajo del nivel de intensidad sonora máximo permitido por el dispositivo. El uso de esta escala no debe suponer un problema, ya que el objetivo es ver la variación entre estos valores, y se siguen pudiendo comparar a diferentes intensidades. Solo se debe estar seguro que los resultados nunca salen de la capacidad del dispositivo receptor, ya que, si así fuera, todos los valores por encima de 0 *dBFS* serían cortados.

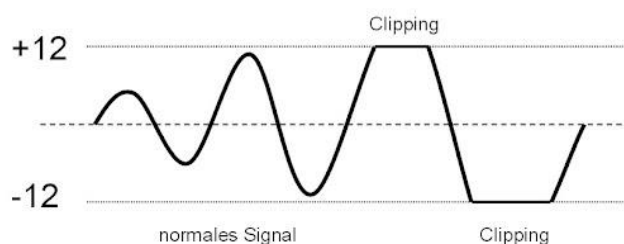


Figura 2. Esquema del funcionamiento del sistema de decibelios a escala completa. Al sobrepasar un NIS máximo, el programa elimina toda frecuencia superior. Fuente: Reddit.com

⁴ McCormick, T., & Rumsey, F. (2004). *Sonido y grabación. Introducción a las técnicas sonoras* (2da ed.). Instituto Oficial de radio y televisión, RTVE.

⁴ McCormick, T., & Rumsey, F. (2004). *Sonido y grabación. Introducción a las técnicas sonoras* (2da ed.). Instituto Oficial de radio y televisión, RTVE.

3. PARTE EXPERIMENTAL

El siguiente paso en la investigación es realizar el experimento que nos permitirá responder a nuestra pregunta. Debemos tener presentes los parámetros que queremos estudiar, que son la intensidad y el timbre del sonido.

3.1. Metodología

Antes de entrar en experimento en cuestión se incluye una explicación general de la metodología seguida en éste.

El objetivo principal es encontrar la relación entre la intensidad y los armónicos del sonido, por lo tanto, en primer lugar, se debe encontrar una forma de medir ambos. Como se ha desarrollado en el marco teórico, el software *Audacity* permite realizar un *Análisis del Espectro Sonoro*, donde se podrá visualizar cuáles son los NIS de los diferentes armónicos del sonido. Por así decirlo, el programa permite saber cuál es la proporción de los armónicos en la mezcla sonora, dando sus valores en las unidades *dBFS*.

Por otro lado, se necesita algún sistema que permita saber el NIS del sonido en su forma general. En esta parte del experimento se utilizará la aplicación móvil *Arduino Science Journal*, un *software* complejo que se sirve de los diferentes sensores de un teléfono móvil para poder cuantificar un rango de magnitudes distintas de forma ordenada y profesional. En este caso, se utiliza el sensor de *Intensidad Sonora*, que proporciona un NIS en *dB* en función del tiempo de grabación.

Recordando el objetivo (2) del estudio, se deben escoger cuáles son las notas más indicadas para analizar. Se decide que la mejor opción es analizar las notas de la escala de Si bemol mayor, que van de *Sib2* a *Sib3*. Esta decisión se basa en que las características físicas del instrumento hacen que esta escala sea la más fácil de tocar a distintas intensidades (ya que se encuentra dentro del rango medio), y suene menos desafinada (ya que utiliza posiciones de la vara bastante concretas). Así pues, se analizarán 8 frecuencias distintas que oscilan en el rango de una octava.

Para facilitar el tratamiento de datos, también se aprovecha la característica que el trombón es un instrumento de sonido continuo, es decir, que puedes modificar

la intensidad de la nota a consciencia en medio de esta. Así que, realizando lo que en lenguaje musical se llamaría un *crescendo* (tocar una nota a intensidad baja y aumentarla progresivamente) podemos conseguir un gran rango de NIS con una sola grabación. Con un instrumento como el piano, es imposible regular la intensidad de la nota mientras esta suena, así que se deberían realizar numerosas grabaciones por cada nota estudiada.

3.2. Clasificación de variables

Una vez determinada la metodología a seguir, se definen y especifican cuáles son las variables que intervienen en el experimento.

-Variables independientes: es en la que se producen cambios de forma directa para observar su resultado en la variable dependiente. Así pues, en este caso se trata del NIS general de la frecuencia, medido en decibelios (*dB*).

-Variable dependiente: es la que se ve afectada por los cambios producidos en la variable independiente, así que en este caso se trata de los diferentes niveles de sonido de cada armónico, medidos en decibelios *Full-Scale (dBFS)*.

-Variables controladas: se tratan de todas las variables que se mantienen constantes durante el experimento. Se enumeran las siguientes: el instrumento utilizado (Trombón C. G. Conn, 88H o/w), espacio de grabación (aula de estudio 13 del conservatorio de mi ciudad), receptor sonoro utilizado (micrófono del teléfono *Xiaomi Redmi Note 5*), condiciones ambientales de presión, temperatura... (no serán medidos, pero se puede asegurar que se mantienen constantes, ya que las tomas de datos se realizan consecutivamente en un periodo de tiempo corto), distancia del emisor al receptor sonoro.

También se considerará que la frecuencia de la nota (*Hz*) es una variable controlada, ya que al realizar una experiencia se mantendrá constante, aunque se realicen réplicas de la misma experiencia en distintas frecuencias. Así pues, a nivel global del estudio se podría llegar a considerar variable independiente (ya que será modificada para observar cambios en las variables dependientes), pero en cada experiencia concreta se tratará de una variable controlada, ya que será constante.

3.3. Diseño experimental

3.3.1. Material

Los materiales y programas utilizados a lo largo del experimento son los siguientes:

- Trombón C. G. Conn, 88H o/w -Software *Audacity* ($\pm 0,1dBFS$)
- Pañuelo de ropa -Software *Arudino Science Journal* ($\pm 0,01dB$)
- Micrófono Xiaomi Redmi Note 5
- Soporte para el micrófono (mesa de madera)

3.3.2. Montaje

Antes de empezar el procedimiento, es importante saber cómo exactamente se realizará la toma de datos. Se pone el receptor encima del pañuelo y éstos dos encima del soporte. El pañuelo tiene la utilidad de amortiguar las posibles resonancias del soporte o del mismo receptor al emitir una frecuencia. De no ser así, las frecuencias y armónicos resonantes podrían interferir en los datos. El soporte será útil para situar el receptor a la altura del emisor para que las ondas sonoras lleguen directamente al micrófono sin rebotar en superficies.

Por otro lado, el emisor se situará a unos 5 metros del receptor. Es una distancia media, que evitará que haya demasiadas interferencias pero que también evitará que, al tocar el instrumento a intensidades altas, el receptor se sature y no capte todas las frecuencias debidas.

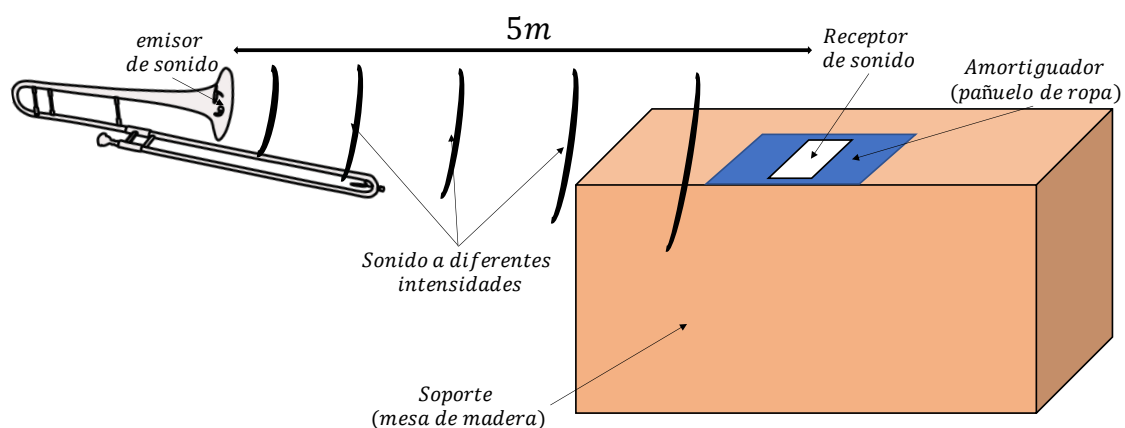


Figura 3. Esquema del montaje del experimento.

3.3.3. Procedimiento

1-Se prepara el montaje experimental. Se sitúa el receptor sonoro sobre un pañuelo de ropa encima de una mesa de madera. El emisor se sitúa a unos 5 metros del receptor para evitar el colapso de este.

2-Se activa la grabación del receptor. El músico empieza a tocar la primera nota, un Si b 2 (116,5 Hz³). Cualitativamente, empieza a tocar con una intensidad baja (la más baja que sea posible) y la aumenta progresivamente, hasta llegar al límite de la capacidad del instrumento, es decir, hasta tocar lo más fuerte posible.

3-Se finaliza la grabación, y se guardan y nombran tanto el archivo de sonido captado por la grabadora del dispositivo como el archivo del sensor de NIS de la aplicación *Arduino Science Journal*.

4-Se repiten los pasos 2 y 3 con las 8 frecuencias distintas: Si b 2, Do 3, Re 3, (...)

5-Se empieza el análisis de las grabaciones. En primer lugar, se deben alinear los archivos de sonido (que importamos al programa *Audacity*) y de *Arduino* para poder corresponder los datos de las dos variables. Como se han realizado las grabaciones al mismo tiempo exacto, nos servimos del eje temporal de las gráficas. (El segundo 10,6 será el mismo para las dos variables).

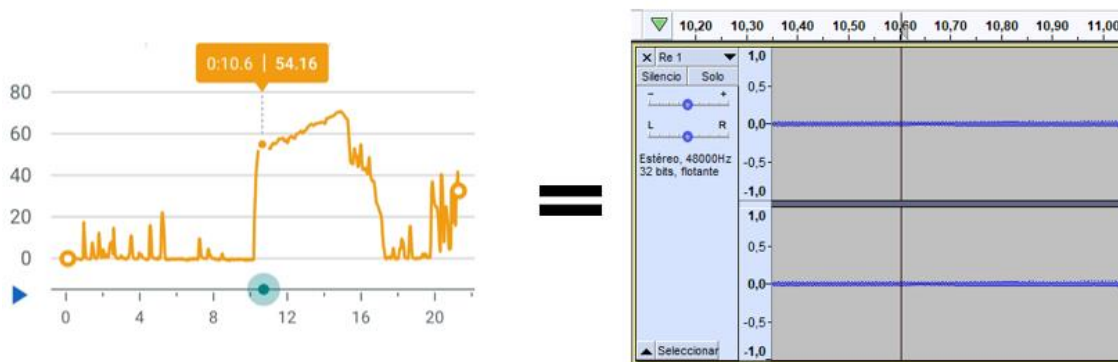


Figura 4. Alineación de los dos programas en el mismo instante de tiempo de la nota Re 3 a un NIS general de 54,16 dB.

6-Se empieza la toma de datos. A la hora de decidir qué NIS que se quiere analizar, se debe tener en cuenta que se quieren realizar al menos 5 medidas

³ Ciudad Pentagrama. (25 de septiembre de 2021). *Tabla de las frecuencias de las notas musicales*.

por grabación. Se recoge el primer valor de NIS general (en la *app Arduino Science Journal*) y, en el programa *Audacity*, se utiliza la herramienta “Análisis de espectro sonoro” en el mismo instante temporal.

7-Se anotan cuáles son los NIS de cada uno de los 10 primeros armónicos (en dBFS), asegurándose que la frecuencia fundamental f coincide con la frecuencia teórica de la nota, y que los 10 armónicos son sus respectivos múltiplos.

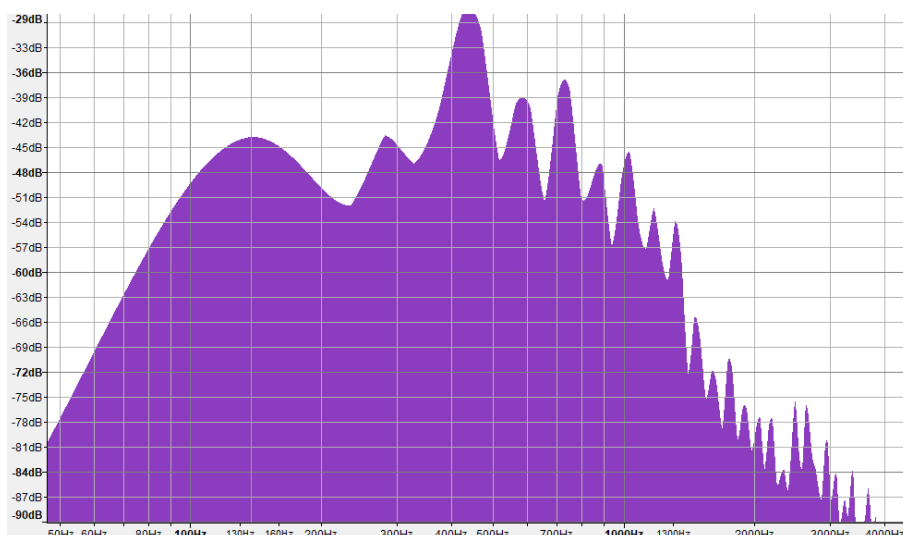


Figura 5. Gráfico resultante del análisis de espectro sonoro de la nota Re 3 al NIS general de 54,16 dB. Se pueden observar los picos que forman los armónicos en sus respectivas frecuencias. Para consultar el resto de gráficos, véase Anexos.

8-Se repiten los pasos 6 y 7 por diferentes NIS de la grabación, de forma que se obtengan entre 5 y 6 medidas por frecuencia.

4. RESULTADOS

El siguiente paso en el estudio es recoger el gran número de datos obtenidos y procesarlos para obtener los resultados finales.

4.1. Recolecta de datos

Anotamos cuáles son los valores obtenidos por cada uno de los 10 armónicos en cada valor de NIS. La incertidumbre de los valores será más grande que el límite de lectura, ya que de este modo se tendrán en cuenta posibles afectaciones o interferencias que produzcan error sistemático. También se anotan los valores teóricos encontrados por las 8 frecuencias correspondientes a las notas³. Para ver los resultados gráficos del análisis sonoro, véase Anexos.

Si b 2 (116,5 Hz)					
NIS (dB) (±0,10)	f (dBFS) (±0,5)	2f (dBFS) (±0,5)	3f (dBFS) (±0,5)	4f (dBFS) (±0,5)	5f (dBFS) (±0,5)
41,44			-53,8	-30,8	-48,6
45,25			-51,1	-30,2	-36,0
52,97			-46,5	-25,9	-34,2
58,14			-45,1	-27,0	-27,2
63,55			-40,6	-21,1	-32,9
NIS (dB) (±0,10)	6f (dBFS) (±0,5)	7f (dBFS) (±0,5)	8f (dBFS) (±0,5)	9f (dBFS) (±0,5)	10f (dBFS) (±0,5)
41,44	-39,8	-42,9	-46,3	-66,0	-64,4
45,25	-33,4	-35,3	-36,1	-46,6	-50,3
52,97	-30,7	-30,9	-31,1	-42,3	-34,8
58,14	-30,9	-26,6	-24,7	-29,0	-33,5
63,55	-29,0	-26,3	-27,4	-39,7	-29,6

Tabla 1. NIS general y NIS de los armónicos de la frecuencia 116,5 Hz (Si b 2).

Do 3 (130,8 Hz)					
NIS (dB) (±0,10)	f (dBFS) (±0,5)	2f (dBFS) (±0,5)	3f (dBFS) (±0,5)	4f (dBFS) (±0,5)	5f (dBFS) (±0,5)
48,39	-55,3	-44,1	-31,1	-43,4	-41,8
55,94	-52,4	-40,0	-27,0	-40,5	-32,2
60,13	-51,6	-37,2	-24,2	-34,0	-27,5
63,61			-23,3		-25,8
66,40			-21,4	-33,4	-22,1
69,87			-20,2	-30,3	-21,1
NIS (dB) (±0,10)	6f (dBFS) (±0,5)	7f (dBFS) (±0,5)	8f (dBFS) (±0,5)	9f (dBFS) (±0,5)	10f (dBFS) (±0,5)
48,39	-42,8	-49,9	-57,9	-62,3	-66,6
55,94	-31,5	-40,5	-47,2	-49,5	-51,7
60,13	-34,4	-33,0	-41,8	-42,5	-40,5
63,61	-23,0	-28,7	-34,0	-35,1	-34,5
66,40	-18,8	-27,4	-30,1	-31,5	-29,4
69,87	-17,5	-27,2	-28,9	-29,6	-27,1

Tabla 2. NIS general y NIS de los armónicos de la frecuencia 130,8 Hz (Do 3)

³ Ciudad Pentagrama. (25 de septiembre de 2021). *Tabla de las frecuencias de las notas musicales.*

<i>Re 3 (146,8 Hz)</i>					
<i>NIS (dB)</i> (±0,10)	<i>f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>2f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>3f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>4f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>5f (dBFS)</i> (±0,5)
54,16	-43,8	-43,5	-28,4	-39	-35,1
57,32	-42,2	-44,8	-27,7	-29,7	-32,3
62,31	-41,6	-44,2	-25,8	-27,3	-27,8
65,48	-43,1	-42,4	-25,0	-22,0	-20,8
67,85	-45,3	-45,1	-22,1	-22,0	-16,8
70,74		-41,1	-20,3	-19,4	-14,4
<i>NIS (dB)</i> (±0,10)	<i>6f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>7f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>8f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>9f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>10f (dBFS)</i> (±0,5)
54,16	-44,9	-57,7	-52,0	-53,8	-65,3
57,32	-35,8	-53,2	-49,1	-48,3	-61,7
62,31	-33,9	-47,4	-43,9	-40,5	-50,5
65,48	-22,6	-40,1	-36,2	-33,2	-44,8
70,74	-17,2	-24,1	-20,4	-26,1	-20,5

Tabla 3. NIS general y NIS de los armónicos de la frecuencia 146,8 Hz (Re 3).

<i>Mi b 3 (155,6 Hz)</i>					
<i>NIS (dB)</i> (±0,10)	<i>f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>2f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>3f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>4f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>5f (dBFS)</i> (±0,5)
49,32	-48,7	-36,2	-35,6	-45,1	-49,4
52,16	-49,4	-35,3	-30,3	-41,1	-42,6
54,89	-46,7	-30,1	-29,0	-37,8	-37,2
59,84		-28,6	-28,2	-30,0	-28,6
64,35		-28,8	-25,5	-35,6	-22,4
67,90		-28,4	-24,6	-32,7	-21,2
<i>NIS (dB)</i> (±0,10)	<i>6f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>7f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>8f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>9f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>10f (dBFS)</i> (±0,5)
49,32	-76,5	-57,1	-62,9	-79,8	-78,1
52,16	-70,8	-49,8	-54,3	-64,2	-65,8
54,89	-60,7	-42,2	-52,3	-51,8	-58,2
59,84	-41,8	-29,2	-32,3	-38,7	-42,7
64,35	-33,1	-19,9	-22,3	-29,8	-35,1
67,90	-33,6	-17,0	-19,6	-28,5	-32,0

Tabla 4. NIS general y NIS de los armónicos de la frecuencia 155,6 Hz (Mi b 3).

<i>Fa 3 (174,6 Hz)</i>					
<i>NIS (dB)</i> (±0,10)	<i>f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>2f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>3f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>4f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>5f (dBFS)</i> (±0,5)
53,65	-50,8	-31,9	-40,9	-28,7	-33,7
57,77	-69,1	-34,4	-32,2	-34,9	-28,1
60,65	-81,0	-53,1	-26,1	-27,1	-23,2
63,03	-84,2	-55,7	-25,8	-25,2	-16,7
67,00	-83,8	-64,2	-26,5	-23,9	-16,4
<i>NIS (dB)</i> (±0,10)	<i>6f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>7f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>8f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>9f (dBFS)</i> (±0,5)	<i>10f (dBFS)</i> (±0,5)
53,65	-37,6	-51,7	-58,5	-69,3	-73,7
57,77	-35,7	-45,1	-45,7	-53,8	-63,5
60,65	-29,4	-32,1	-33,3	-48,5	-58,7
63,03	-24,2	-28,2	-31,1	-32,1	-45,7
67,00	-21,3	-24,5	-39,4	-20,1	-39,8

Tabla 5. NIS general y NIS de los armónicos de la frecuencia 174,6 Hz (Fa 3).

Sol 3 (196,0 Hz)					
NIS (dB) ($\pm 0,10$)	f (dBFS) ($\pm 0,5$)	2f (dBFS) ($\pm 0,5$)	3f (dBFS) ($\pm 0,5$)	4f (dBFS) ($\pm 0,5$)	5f (dBFS) ($\pm 0,5$)
53,51	-44,4	-28,6	-35,4	-48,6	-39,3
56,86	-69,4	-25,3	-25,6	-37,4	-44,2
59,05	-66,2	-22,3	-22,1	-36,8	-30,4
63,57	-62,3	-18,7	-19,7	-27,1	-22,7
66,29	-60,6	-16,2	-18,1	-27,6	-18,3
70,80	-59,2	-15,2	-17,3	-21	-15,9
NIS (dB) ($\pm 0,10$)	6f (dBFS) ($\pm 0,5$)	7f (dBFS) ($\pm 0,5$)	8f (dBFS) ($\pm 0,5$)	9f (dBFS) ($\pm 0,5$)	10f (dBFS) ($\pm 0,5$)
53,51	-54,9	-71,3	-77,8	-75,6	-75,3
56,86	-50,2	-53,8	-55,4	-68,1	-71,5
59,05	-40,9	-46,2	-41,0	-48,0	-60,9
63,57	-39,0	-39,9	-36,7	-40,6	-52,7
66,29	-29,2	-39,4	-27,7	-30,9	-45,4
70,80	-30,7	-22,5	-27,5	-28,6	-46,4

Tabla 6. NIS general y NIS de los armónicos de la frecuencia 196,0 Hz (Sol 3).

La 3 (220,0 Hz)					
NIS (dB) ($\pm 0,10$)	f (dBFS) ($\pm 0,5$)	2f (dBFS) ($\pm 0,5$)	3f (dBFS) ($\pm 0,5$)	4f (dBFS) ($\pm 0,5$)	5f (dBFS) ($\pm 0,5$)
48,97	-52,9	-32,4	-19,3	-21,3	-43,2
51,17	-51,5	-32,3	-15,8	-19,3	-40,3
57,88	-50,6	-30,5	-12,8	-14,8	-39,5
66,52	-50,2	-23,6	-10,8	-9,3	-36,3
73,22	-48,6	-21,1	-8,7	-6,9	-28,2
77,81	-47,9	-20,7	-8,3	-7,1	-20,1
NIS (dB) ($\pm 0,10$)	6f (dBFS) ($\pm 0,5$)	7f (dBFS) ($\pm 0,5$)	8f (dBFS) ($\pm 0,5$)	9f (dBFS) ($\pm 0,5$)	10f (dBFS) ($\pm 0,5$)
48,97	-39,7	-42,2	-52,3	-61,1	-82,0
51,17	-33,9	-39,1	-49,5	-59,6	-74,9
57,88	-26,0	-26,8	-39,4	-49,1	-61,9
66,52	-22,3	-23,9	-29,9	-41,8	-48,3
73,22	-17,4	-19,0	-25,9	-36,8	-37,3
77,81	-15,3	-17,6	-31,2	-29,2	-32,2

Tabla 7. NIS general y NIS de los armónicos de la frecuencia 220,0 Hz (La 3).

Si b 3 (233,1 Hz)					
NIS (dB) ($\pm 0,10$)	f (dBFS) ($\pm 0,5$)	2f (dBFS) ($\pm 0,5$)	3f (dBFS) ($\pm 0,5$)	4f (dBFS) ($\pm 0,5$)	5f (dBFS) ($\pm 0,5$)
55,93	-28,2	-38,2	-31,8	-46,8	-69,2
60,69	-27,5	-23,6	-25,0	-43,4	-68,5
62,39	-28,3	-21,9	-22,9	-43,6	-65,5
65,89	-27,0	-20,2	-18,5	-42,8	-57,5
67,64	-27,3	-18,8	-16,6	-34,1	-55,5
70,14	-25,8	-18,4	-11,3	-32,9	-43,7
NIS (dB) ($\pm 0,10$)	6f (dBFS) ($\pm 0,5$)	7f (dBFS) ($\pm 0,5$)	8f (dBFS) ($\pm 0,5$)	9f (dBFS) ($\pm 0,5$)	10f (dBFS) ($\pm 0,5$)
55,93	-61,3	-58,1	-65,3	-72,2	-75,0
60,69	-61,3	-56,2	-62,9	-62,1	-65,7
62,39	-50,7	-56,3	-59,7	-55,5	-61,6
65,89	-45,6	-55,6	-53,7	-45,5	-55,3
67,64	-47,9	-53,5	-48,8	-39,4	-49,6
70,14	-32,9	-36,8	-45,3	-33,4	-43,4

Tabla 8. NIS general y NIS de los armónicos de la frecuencia 233,1 Hz (Si b 3).

Se puede observar que en general la recolecta de datos ha sido satisfactoria. Aun así, en algunos casos el programa de sonido no ha sido capaz de dar un pico para algunos de los armónicos (véase tabla 1: columnas f y $2f$, tabla 2: columnas f y $2f$, tabla 3: columna f , tabla 4: columna f). Observando que esto solo ha pasado en las frecuencias más bajas, se puede llegar a la conclusión que se trata de un problema del receptor sonoro: es posible que las frecuencias más bajas a más intensidad lo saturen, y por lo tanto las elimine de la mezcla sonora.

4.2. Tratamiento de datos

Una vez se han conseguido reunir los datos numéricos, se deben graficar para poder ver qué relación existe entre ellos. Se crea un gráfico por cada frecuencia distinta, con el NIS general en dB en el eje de las x , y el NIS de cada armónico en $dBFS$ en el eje de las y . Por lo tanto, obtendremos 8 gráficos, y en cada uno de ellos 10 series (una para cada armónico). Por el momento, interesa observar cuál es la progresión de cada armónico: como más grande sea m (la pendiente) de una serie, más habrá aumentado el NIS del armónico en cuestión. Abajo, ejemplo de la representación en la nota Si b 2. Para el resto de gráficos, véase Anexos.

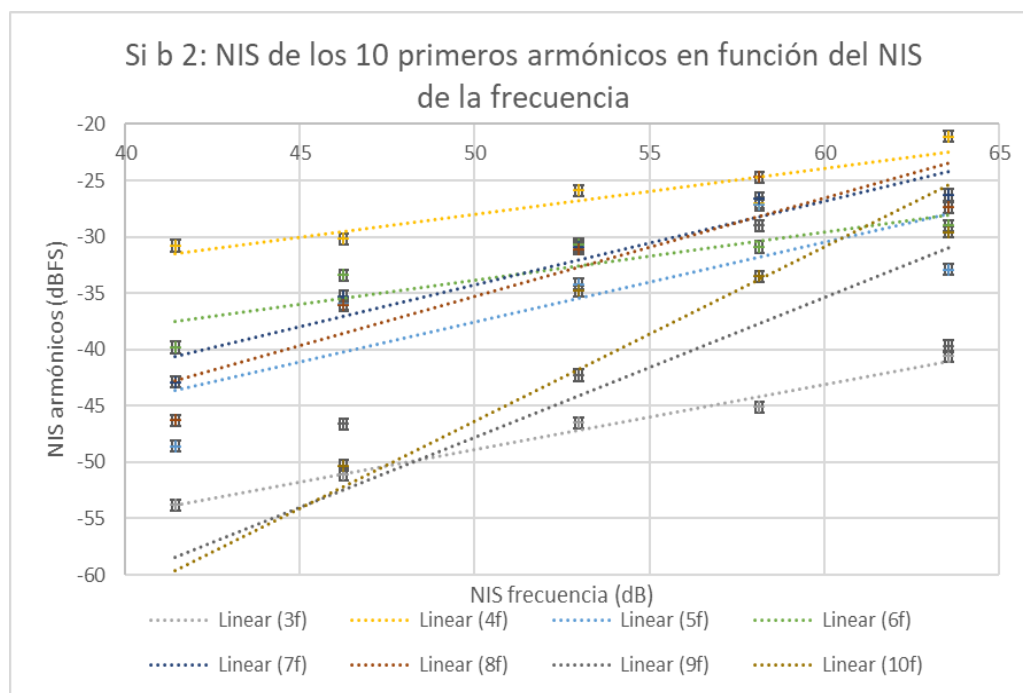


Gráfico 42. Muestra la relación de los NIS de cada uno de los 10 armónicos con el NIS general de la frecuencia respectiva en la nota Si b 2.

En la siguiente tabla se recogen las pendientes m_1 de todos los armónicos estudiados. La pendiente se expresa en unidades de $dBFS/dB$. Respecto a la incertidumbre de las pendientes, normalmente calculada con las pendientes máxima y mínima en cada caso, se considerará de $\pm 0,01$ en todos los casos, ya que, mediante el método estándar, la diferencia entre las pendientes era demasiado pequeña para considerarla una incertidumbre razonable. Así pues, se establece un valor que proporciona un margen de error grande y es un valor el cual ninguna incertidumbre sobrepasará.

Si b 2 (116,5 Hz)		Do 3 (130,8 Hz)		Re 3 (146,8 Hz)	
armónico	m_1 (dBFS/dB) ($\pm 0,01$)	armónico	m_1 (dBFS/dB) ($\pm 0,01$)	armónico	m_1 (dBFS/dB) ($\pm 0,01$)
f		f	0,32	f	-0,09
$2f$		$2f$	0,58	$2f$	0,11
$3f$	0,58	$3f$	0,51	$3f$	0,48
$4f$	0,41	$4f$	0,61	$4f$	1,08
$5f$	0,71	$5f$	0,98	$5f$	1,32
$6f$	0,43	$6f$	1,22	$6f$	1,70
$7f$	0,75	$7f$	1,14	$7f$	2,05
$8f$	0,88	$8f$	1,44	$8f$	1,92
$9f$	1,24	$9f$	1,60	$9f$	1,71
$10f$	1,55	$10f$	1,93	$10f$	2,61
Mi b 3 (155,6 Hz)		Fa 3 (174,6 Hz)		Sol 3 (196,0 Hz)	
armónico	m_1 (dBFS/dB) ($\pm 0,01$)	armónico	m_1 (dBFS/dB) ($\pm 0,01$)	armónico	m_1 (dBFS/dB) ($\pm 0,01$)
f	0,36	f	-2,55	f	0,73
$2f$	0,43	$2f$	-2,65	$2f$	0,81
$3f$	0,51	$3f$	1,11	$3f$	0,94
$4f$	0,62	$4f$	0,56	$4f$	1,48
$5f$	1,55	$5f$	1,42	$5f$	1,67
$6f$	2,57	$6f$	1,35	$6f$	1,51
$7f$	2,25	$7f$	2,21	$7f$	2,45
$8f$	2,49	$8f$	1,64	$8f$	2,75
$9f$	2,72	$9f$	3,73	$9f$	2,89
$10f$	2,49	$10f$	2,65	$10f$	1,89
La 3 (220,0 Hz)		Si b 3 (233,1 Hz)			
armónico	m_1 (dBFS/dB) ($\pm 0,01$)	armónico	m_1 (dBFS/dB) ($\pm 0,01$)		
f	0,15	f	0,15		
$2f$	0,46	$2f$	1,29		
$3f$	0,35	$3f$	1,38		
$4f$	0,52	$4f$	0,99		
$5f$	0,70	$5f$	1,75		
$6f$	0,78	$6f$	1,89		
$7f$	0,84	$7f$	1,13		
$8f$	0,86	$8f$	1,51		
$9f$	1,07	$9f$	2,82		
$10f$	1,70	$10f$	2,21		

Tabla 9. Pendientes m_1 de cada una de las 8 frecuencias.

Se puede observar en la tabla 9 que la gran mayoría de datos ha producido pendientes razonables. A mayor pendiente, más ha crecido el NIS del armónico en cuestión al aumentar el NIS general. Como los datos de f y $2f$ de Si b 2 fueron nulos, era de esperar que las pendientes respectivas también lo fuesen. Aun así, se aprecian 3 resultados fuera de lo común: f de Re 3 y f , $2f$ de Fa 3, en los que la pendiente tiene un valor negativo.

Debemos distinguir entre el primero y los dos últimos: en Re 3, m_1 tiene un valor muy próximo a 0, y eso significa que el NIS del armónico se mantiene más o menos constante, hecho que resulta bastante razonable. En cambio, en el caso de Fa 3, es evidente que no se trata del mismo caso, ya que las pendientes tienen un valor negativo lejano a 0. Este resultado significa que el NIS de f y $2f$ ha disminuido a medida que el NIS general aumentaba, un hecho que no concuerda con las muestras de las otras frecuencias ni con el sentido común. Por lo tanto, todo esto lleva a pensar que se trata de una anomalía causada por un error experimental. Aun habiendo tomado medidas de precaución para evitar resonancias con otros materiales, existe la posibilidad que al aumentar el NIS del sonido (es decir, al tocar a más intensidad) algún material presente en la habitación de grabación haya producido ondas sonoras con una frecuencia inversa a las de los armónicos f y $2f$, y que por lo tanto haya cancelado la percepción de éstos.

Se debe poner en cuestión, pues, los resultados de Fa 3, ya que no se sabe si ha habido afectaciones menos aparentes en otros armónicos.

Una vez se han discernido los diversos aspectos de esta tabla, se debe encontrar la forma de poder establecer relaciones entre los distintos armónicos. Es decir, ahora se puede saber cómo afecta el NIS del sonido a cada armónico concreto de cada nota, pero se deben poder comparar entre ellos: cuáles son los armónicos que aumentan más y cuáles son los que aumentan menos. Para hacerlo, se idea el siguiente gráfico: en el eje de las x constarán los 10 armónicos (f , $2f$, $3f$... $10f$). Este eje no tiene unidades. En el eje de las y constarán las pendientes obtenidas en el paso anterior, es decir, la tasa de crecimiento de cada armónico, en $dBFS/dB$. Si se realiza un gráfico por cada frecuencia, se podrá apreciar si existe alguna relación entre el múltiplo del armónico y el crecimiento

del NIS. Abajo, ejemplo de la representación de la nota Si b 2. Para el resto de gráficos, véase Anexos.

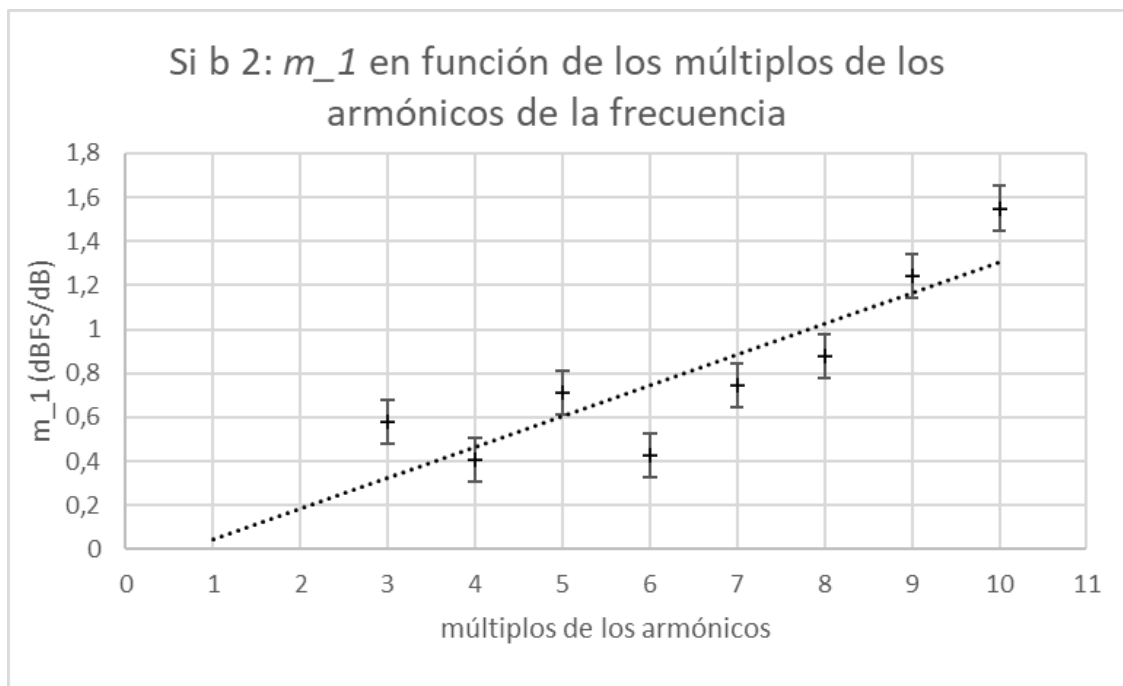


Gráfico 50. Muestra la relación de las pendientes m_1 con los múltiplos de los armónicos de la frecuencia concreta en la nota Si b 2.

Por lo general, se aprecia una clara relación entre el número de múltiplo y el aumento del NIS. Aun así, no todos los gráficos presentan un aumento demasiado regular: notablemente, en la nota Fa 3 aparece un gráfico bastante más desdibujado que en el resto. Recordando que anteriormente ya se ha dudado de la validez de sus resultados, puesto que en los dos armónicos más graves poseía valores incongruentes, se puede descartar esta frecuencia del estudio por falta de fiabilidad de sus datos.

A parte del Fa 3, se observan algunas irregularidades en el armónico $10f$ de la nota Sol 3. Se decide eliminar este dato en cuestión, con la justificación que es un valor demasiado alejado de la tendencia de todo el gráfico, y al tratarse del armónico más agudo es posible que al realizar la grabación el receptor se colapsase al intentar procesar frecuencias agudas a un gran NIS.

Se anotan también las pendientes obtenidas (m_2) en cada una de las frecuencias. Con respecto a la incertidumbre de la pendiente, para evitar usar la fórmula de la pendiente máxima y mínima en los 8 gráficos y obtener valores

concretos y variables, aplicamos un margen de error homogeneizante, suficientemente grande para evitar que algún valor concreto lo sobrepase: $\pm 0,05$ *dBFS/dB*. En referencia a la incertidumbre de las frecuencias, aunque se trate de valores teóricos se admitirá una incertidumbre de $\pm 0,1$ *Hz* con tal de incluir posibles aproximaciones.

Frecuencia (<i>Hz</i>) ($\pm 0,1$)	m_2 (<i>dBFS/dB</i>) ($\pm 0,05$)
116,5	0,14
130,8	0,17
146,8	0,28
155,6	0,31
174,6	0,34
196,0	0,29
220,0	0,13
233,1	0,19

Tabla 10. Pendientes m_2 por cada una de las frecuencias.

Así pues, estos gráficos proporcionan una forma de conocer la relación entre el NIS y la proporción de los armónicos en la mezcla sonora. Aun así, no se ha tenido en cuenta la variable de la frecuencia de la nota. Para hacerlo, se idea un último gráfico, en el que se compara la pendiente m_2 de los gráficos 50-57 con la frecuencia de las notas respectivas. De esta forma, se podrá determinar si la frecuencia del sonido afecta a la relación establecida entre las proporciones de los armónicos y el NIS. Así pues, en eje de las *x* constará la frecuencia del sonido, en *Hz*, y en el eje de las *y* constará la pendiente obtenida en los gráficos 50-57, es decir, el aumento del NIS respecto a los múltiplos del armónico, en unidades de *dBFS/dB*.

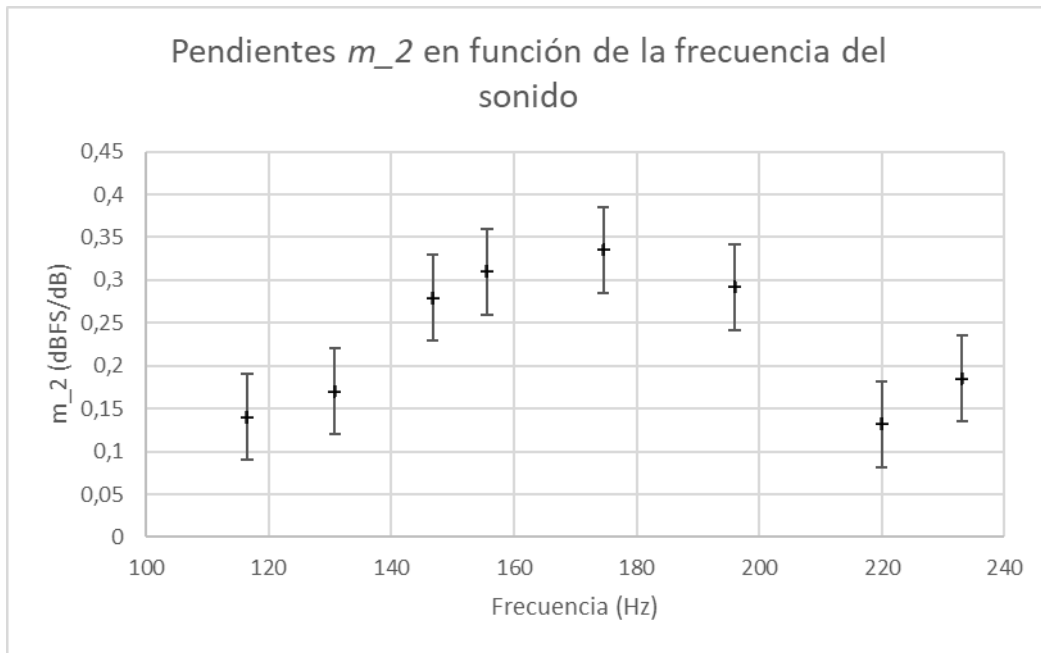


Gráfico 58. Las pendientes m_2 de cada nota obtenidas anteriormente en función de la frecuencia de la nota.

Es evidente que no se puede establecer una relación clara a partir de este gráfico, ya que los valores no siguen ninguna tendencia estudiable.

5. CONCLUSIONES

Finalmente, se deben interpretar los resultados obtenidos y su tratamiento, y sacar las conclusiones finales del estudio respondiendo a los objetivos establecidos.

En primer lugar, se ha podido establecer cuál es la relación entre la intensidad del sonido y sus armónicos. Al aumentar la intensidad de la nota, en todos los casos se ha observado la misma tendencia: los armónicos más agudos tienen un crecimiento más rápido que los graves. Esto provoca que, en intensidades más altas, el sonido tenga una proporción de armónicos agudos mayor que en intensidades más bajas. Relacionando estos resultados con los conceptos tratados en el apartado 2.1, se podrán traducir los datos a la práctica. Si los armónicos sí se ven afectados por la intensidad sonora, significa que el timbre del instrumento cambia al tocar a diferentes intensidades. En concreto, al tocar notas más fuertes los armónicos agudos dominarán sobre los armónicos más graves. Es por eso que, al tocar “fuerte”, se suele decir que el trombón tiene un sonido “brillante”, y al tocar más “flojo” el sonido se vuelve más “apagado”, esa percepción viene dada en realidad por la presencia o la ausencia de frecuencias más agudas en la mezcla sonora. Por lo tanto, se ha podido responder a la pregunta de investigación: aumentar la intensidad del sonido causa un crecimiento en la proporción de los armónicos más agudos.

Por otro lado, también se ha estudiado si la frecuencia del sonido afectaba a esta previa relación, y se ha podido determinar que no había una relación concluyente. Eso no significa que en todas las frecuencias los armónicos se comportaran igual: aunque en general los agudos aumentaban más que los graves, al comparar entre notas distintas, la tasa a lo que lo hacían (es decir, la pendiente de los gráficos 42-49) no seguía ningún patrón y tenía una distribución más bien arbitraria. Este es un aspecto del estudio que me ha sorprendido, ya que había planteado 2 opciones: que la frecuencia no afectase al estudio, es decir, que se mantuviesen unas relaciones estables que no variasen, o que existiese una relación que se pudiera estudiar. Los resultados me llevan a pensar que la precisión de los instrumentos era demasiado baja, y que el sistema en general demasiado rudimentario, para poder acotar una relación estable por esta variable. Por así decirlo, una pequeña variación en la presión del aire no afectaría

a la tendencia general de los armónicos, pero sí que podría causar que los valores de las pendientes de la Tabla 9 variaran minúsculamente y por lo tanto ya no se pudiera establecer una relación entre estos y la frecuencia.

Por lo general, el resultado del estudio ha sido muy satisfactorio, ya que se han llegado a conclusiones interesantes y que concuerdan con las observaciones del medio. Eso no significa que el trabajo no tenga sus fallas: en algunos casos se han tenido que descartar datos por su falta de credibilidad (siempre razonando de dónde podría provenir el error), y en el caso de la variable de la frecuencia no se ha podido determinar una relación concreta.

Hay aspectos del estudio que, en caso de repetirse, se podrían mejorar o ampliar. En primer lugar, es evidente que con instrumentos de medida más exactos y precisos y ambientes más controlados seguramente se podrían obtener resultados más acurados. Aun así, vale la pena reiterar que se valora muy positivamente la calidad de los resultados utilizando instrumentos de medida prácticamente caseros. Por otra parte, recordando que finalmente la nota Fa 3 fue descartada debido a interferencias causadas probablemente por resonancias, sería importante buscar un sistema amortiguador más complejo por tal de reducir este tipo de errores.

Como ya indiqué en la introducción, también existiría la posibilidad de repetir el estudio con diferentes instrumentos para examinar cómo influye la intensidad sonora en sus armónicos. Aun así, es evidente que para un estudio extensivo sería necesario un periodo muy largo de tiempo y de recursos, además, se debería adaptar la metodología a las características propias de cada instrumento.

6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

[1]- Moser, M., & Barros, J. L. (2009). *Ingeniería acústica: teoría y aplicaciones* (2da ed.). Springer.

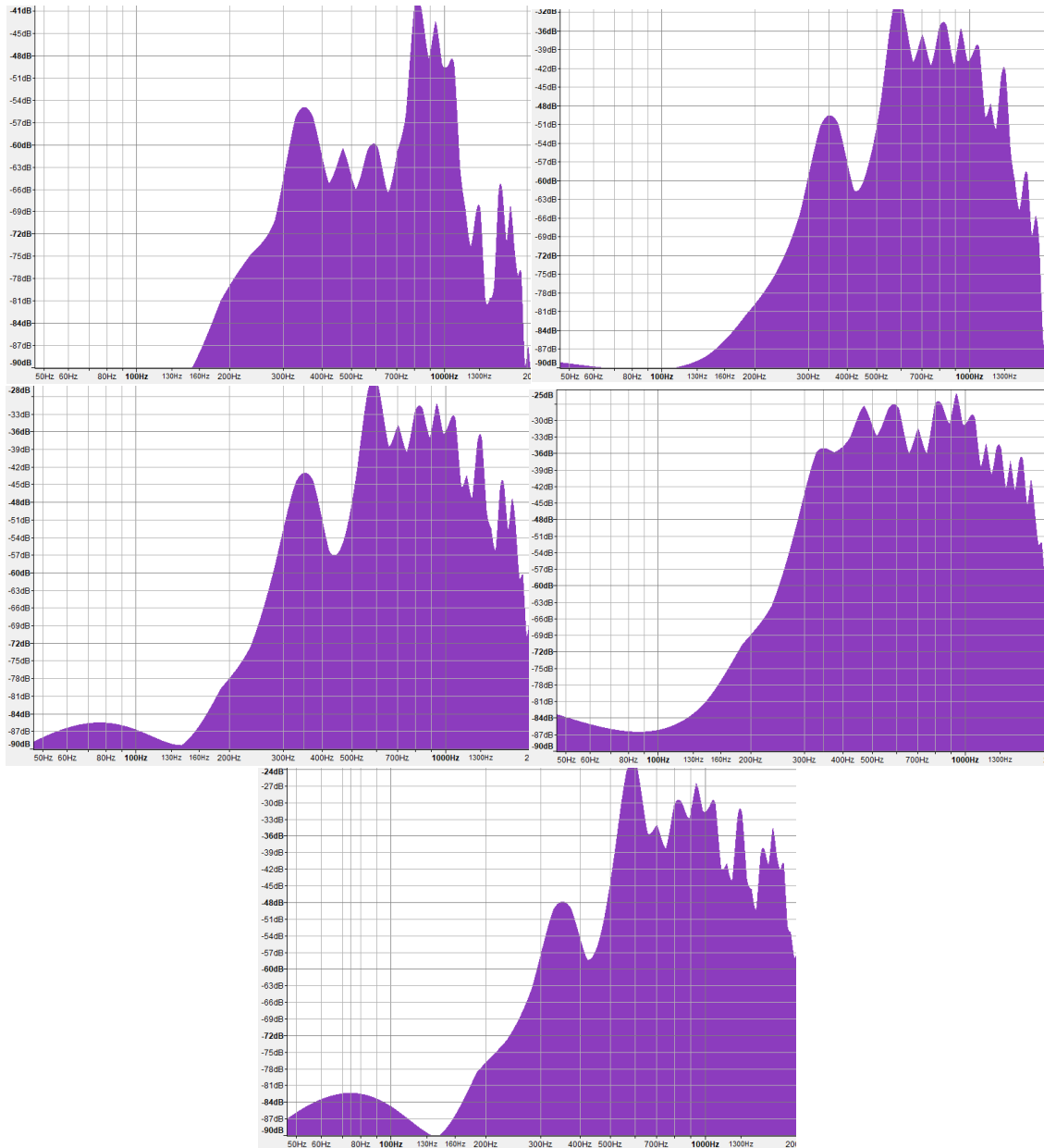
[2]- Wolfe, J. (19 de septiembre de 2021) . *How harmonic are “harmonics”?* School of Physics, The University of South Wales. <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/harmonics.html>

[3]- Ciudad Pentagrama. (25 de septiembre de 2021). *Tabla de las frecuencias de las notas musicales.* <https://www.ciudadpentagrama.com/2020/01/tabla-frecuencias-notas-musicales.html>

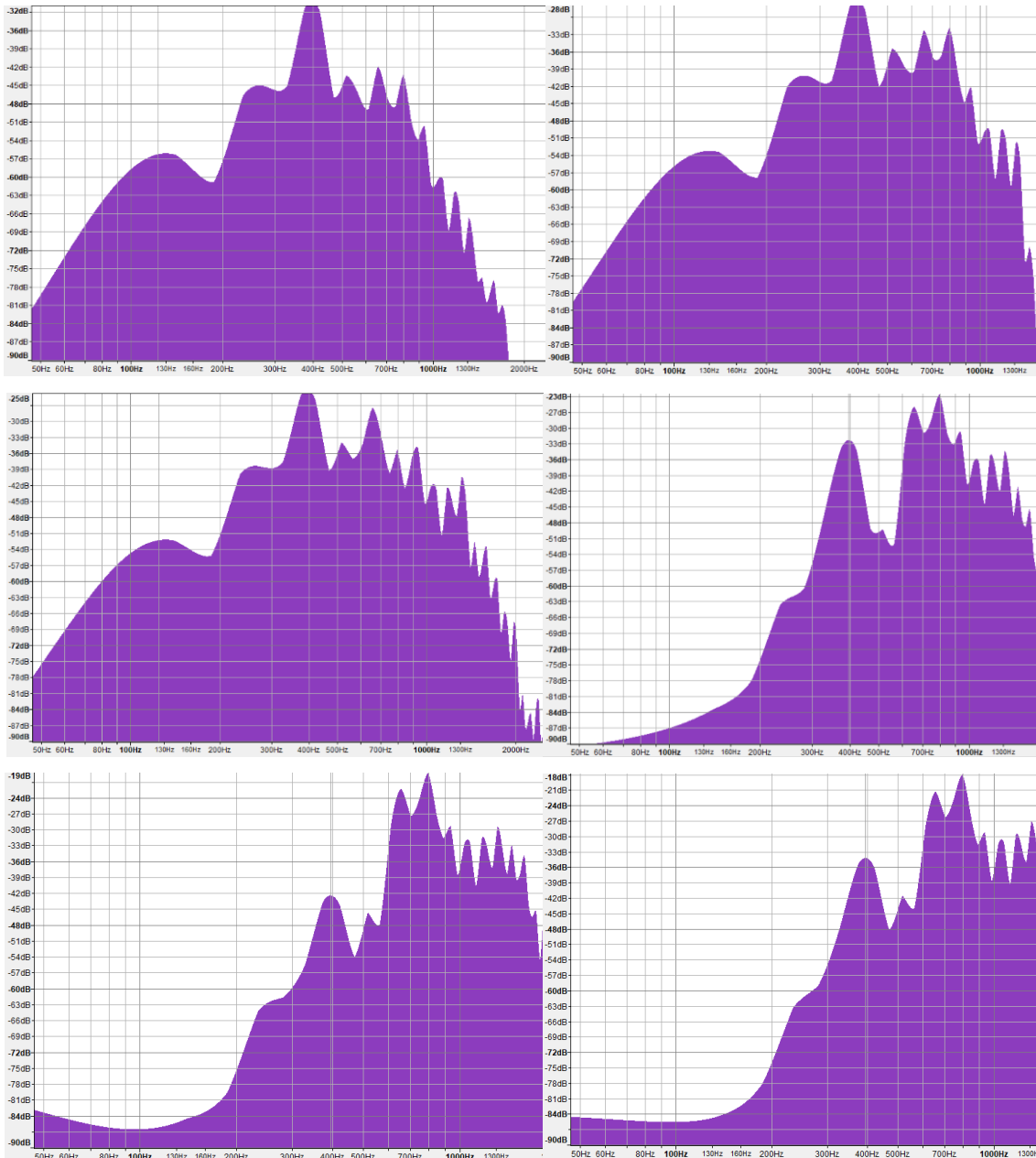
[4]- McCormick, T., & Rumsey, F. (2004). *Sonido y grabación. Introducción a las técnicas sonoras* (2da ed.). Instituto Oficial de radio y televisión, RTVE.

7. ANEXOS

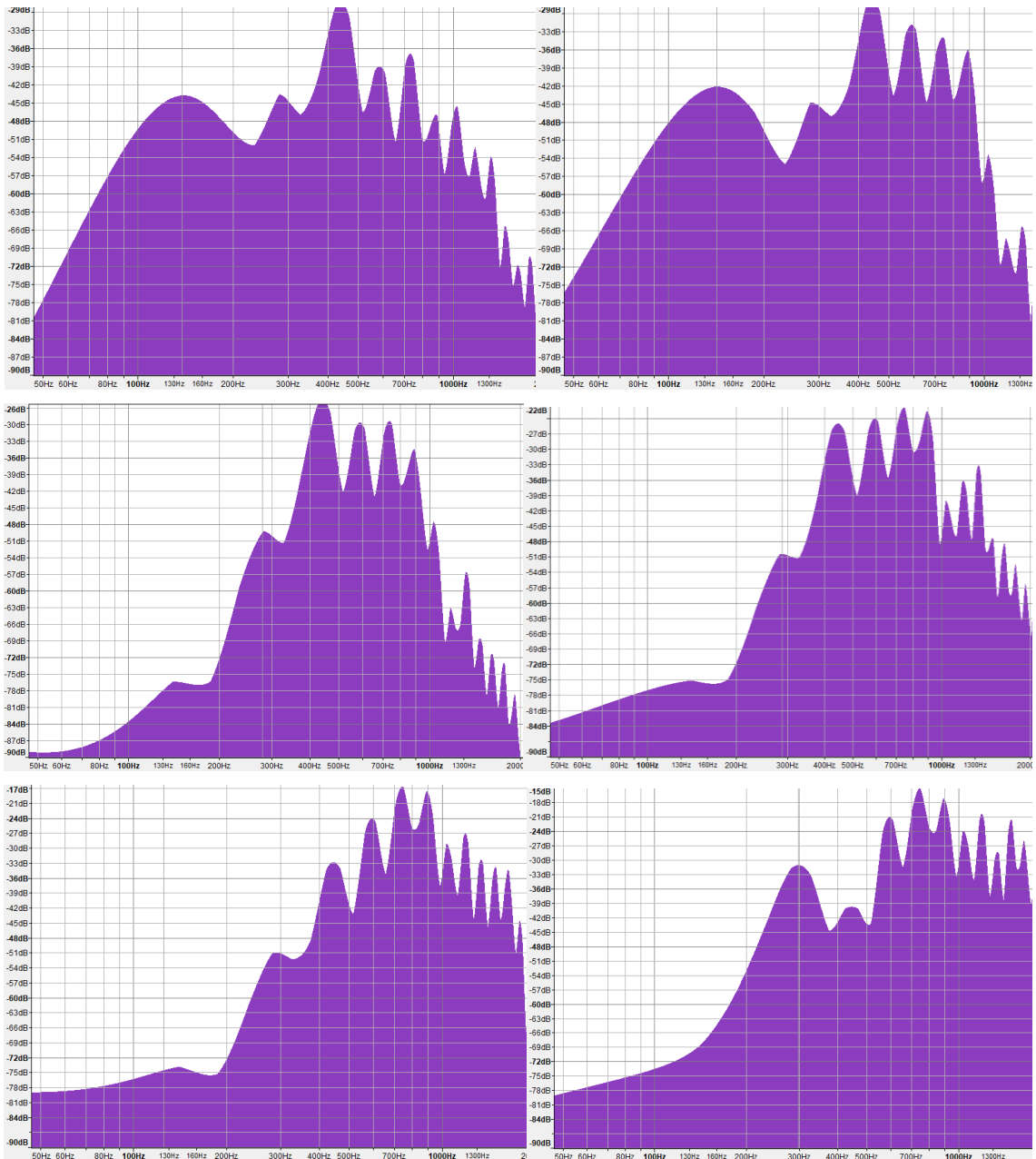
7.1. Gráficos: análisis de espectro sonoro



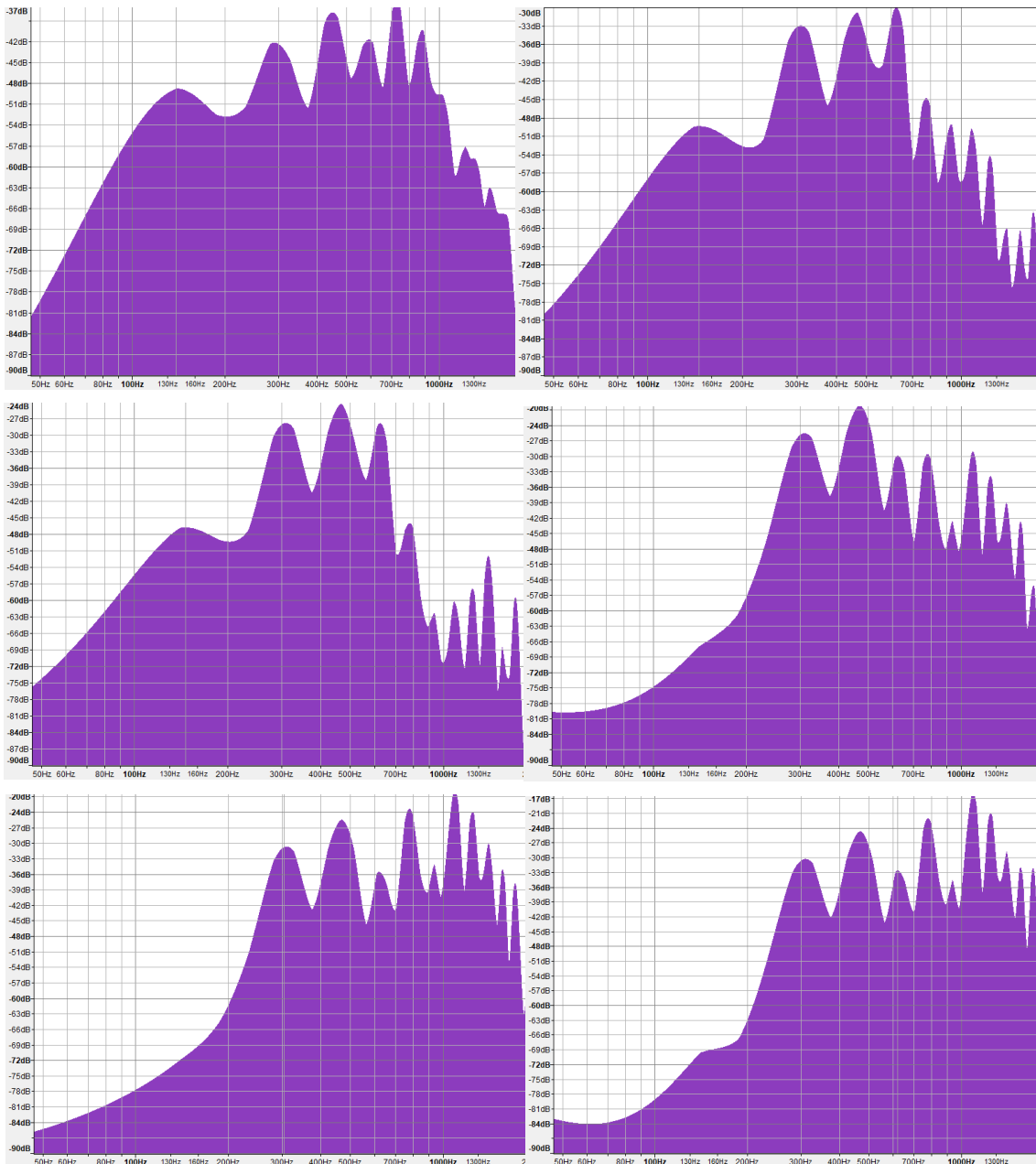
(De izquierda a derecha y de arriba a abajo) **Gráficos 1, 2, 3, 4, 5.** Gráfico resultante del análisis de espectro sonoro de la nota Si b 2 a NIS general de (41,44; 45,25; 52,97; 58,14; 63,55) *dB* respectivamente.



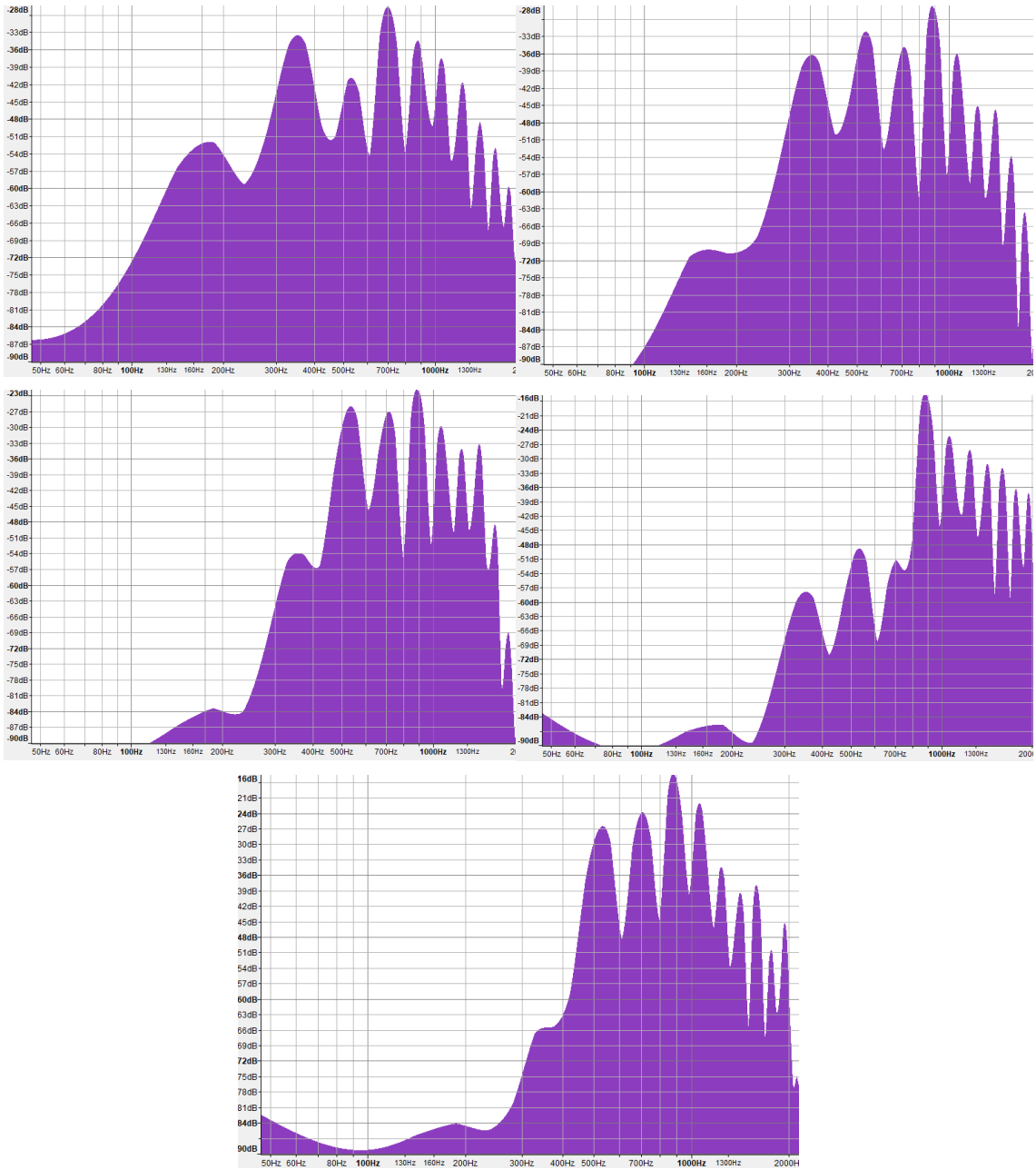
(De izquierda a derecha y de arriba a abajo) **Gráficos 6, 7, 8, 9, 10, 11.** Gráfico resultante del análisis de espectro sonoro de la nota Do 3 a NIS general de (48,39; 55,94; 60,13; 63,61; 66,40; 69,87) dB respectivamente.



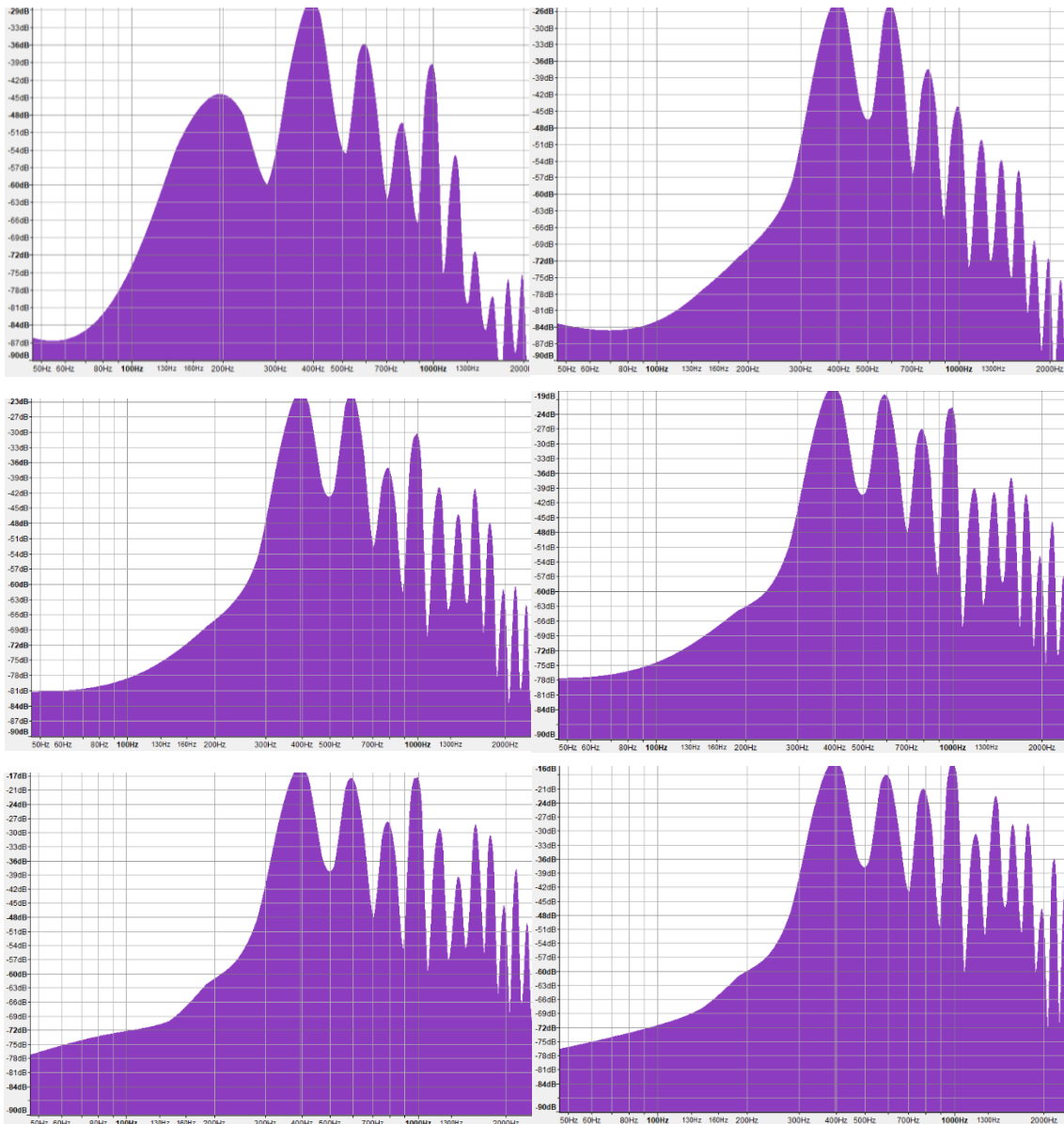
(De izquierda a derecha y de arriba a abajo) **Gráficos 12, 13, 14, 15, 16, 17.** Gráficos resultantes del análisis de espectro sonoro de la nota Re 3 a NIS general de (54,16; 57,32; 62,31; 65,48; 67,85; 70,74) *dB* respectivamente.



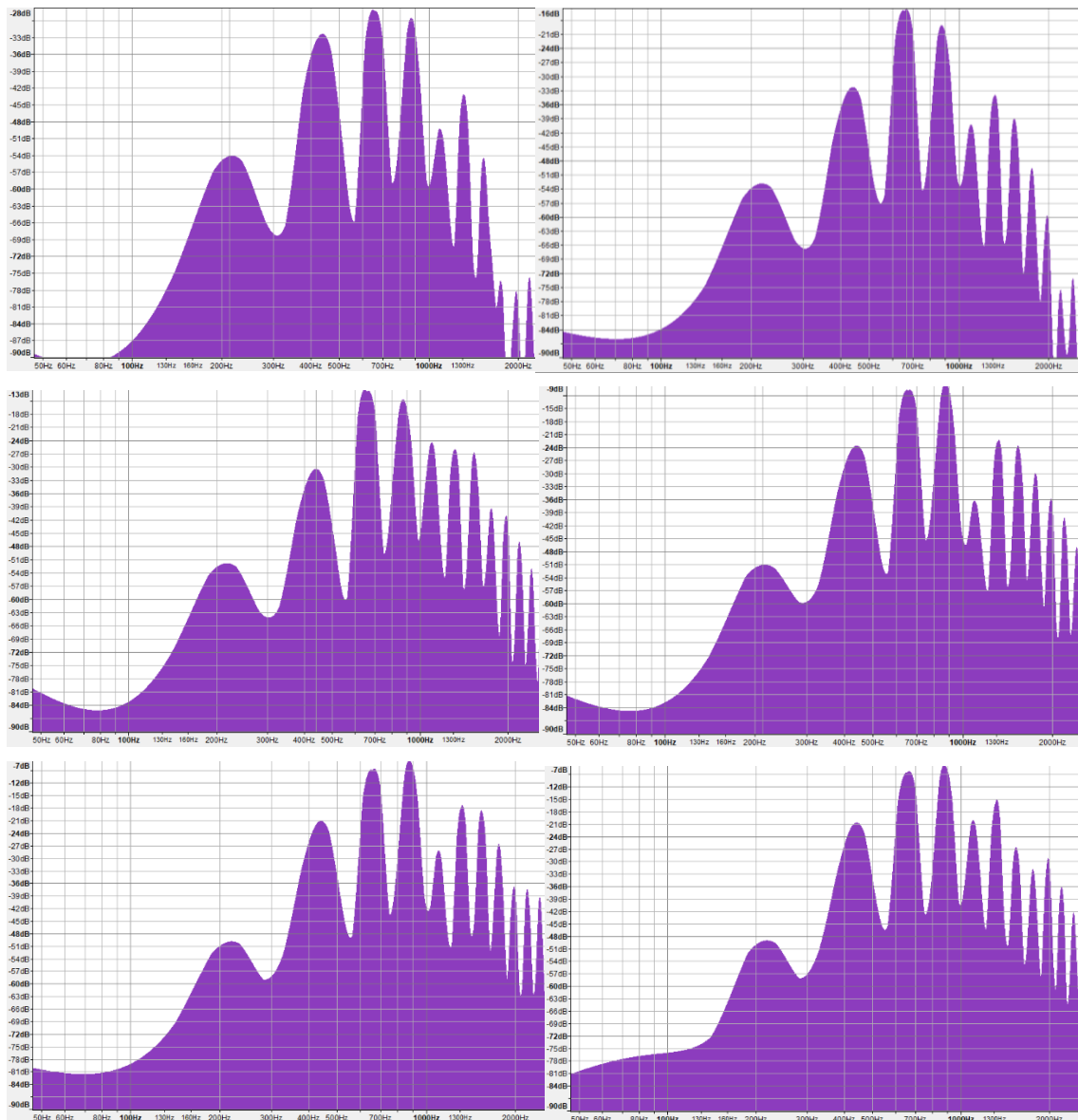
(De izquierda a derecha y de arriba a abajo) **Gráficos 18, 19, 20, 21, 22, 23.** Gráficos resultantes del análisis de espectro sonoro de la nota Mi b 3 a NIS general de (49,32; 52,16; 54,89; 59,84; 64,35; 67,90) *dB* respectivamente.



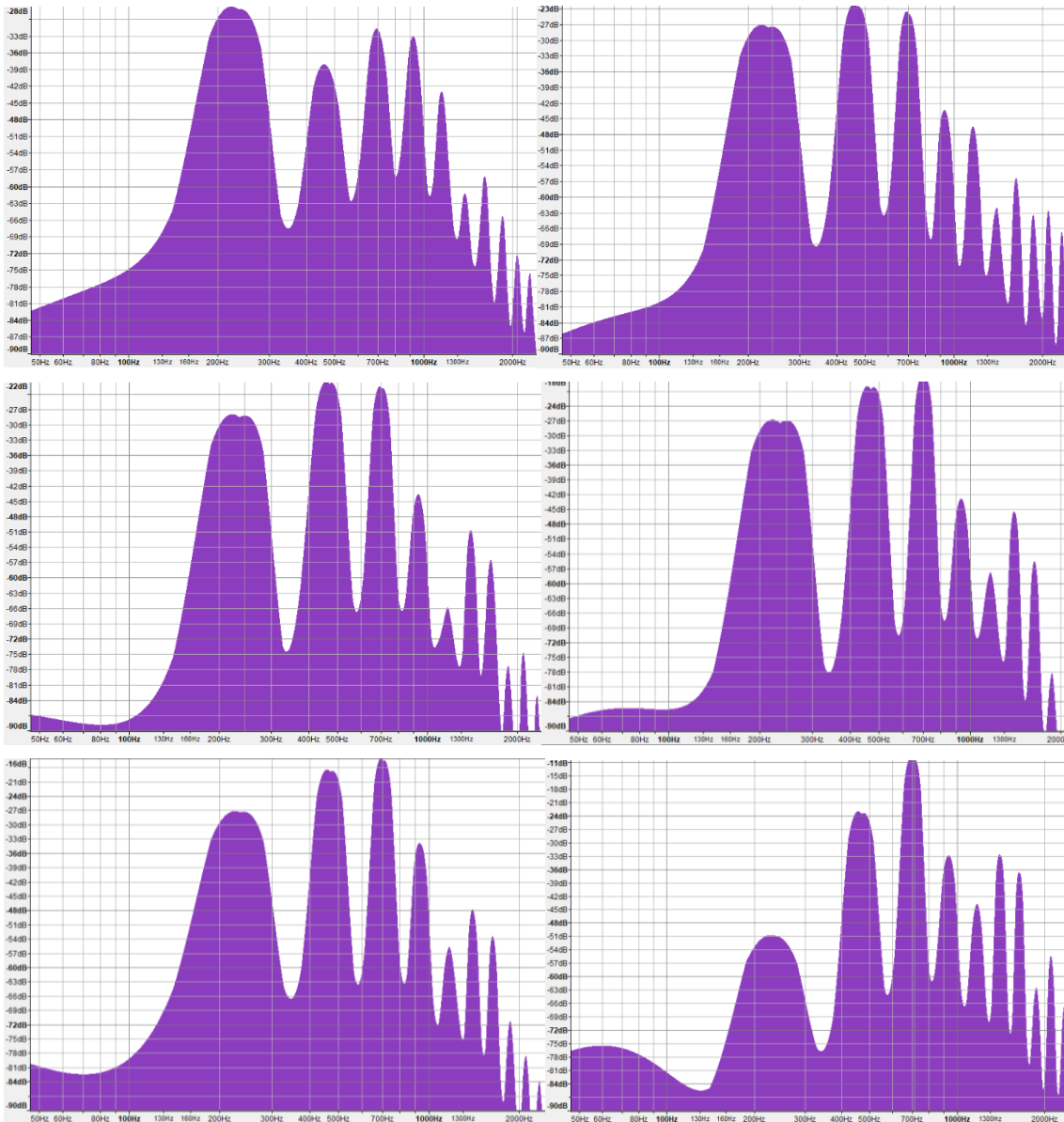
(De izquierda a derecha y de arriba a abajo) **Gráficos 18, 19, 20, 21, 22, 23.** Gráficos resultantes del análisis de espectro sonoro de la nota Fa 3 a NIS general de (53,65; 57,77; 60,65; 63,03; 67,00) dB respectivamente.



(De izquierda a derecha y de arriba a abajo) **Gráficos 24, 25, 26, 27, 28, 29.** Gráficos resultantes del análisis de espectro sonoro de la nota Sol 3 a NIS general de (53,51; 56,86; 59,05; 63,57; 66,29; 70,80) *dB* respectivamente.

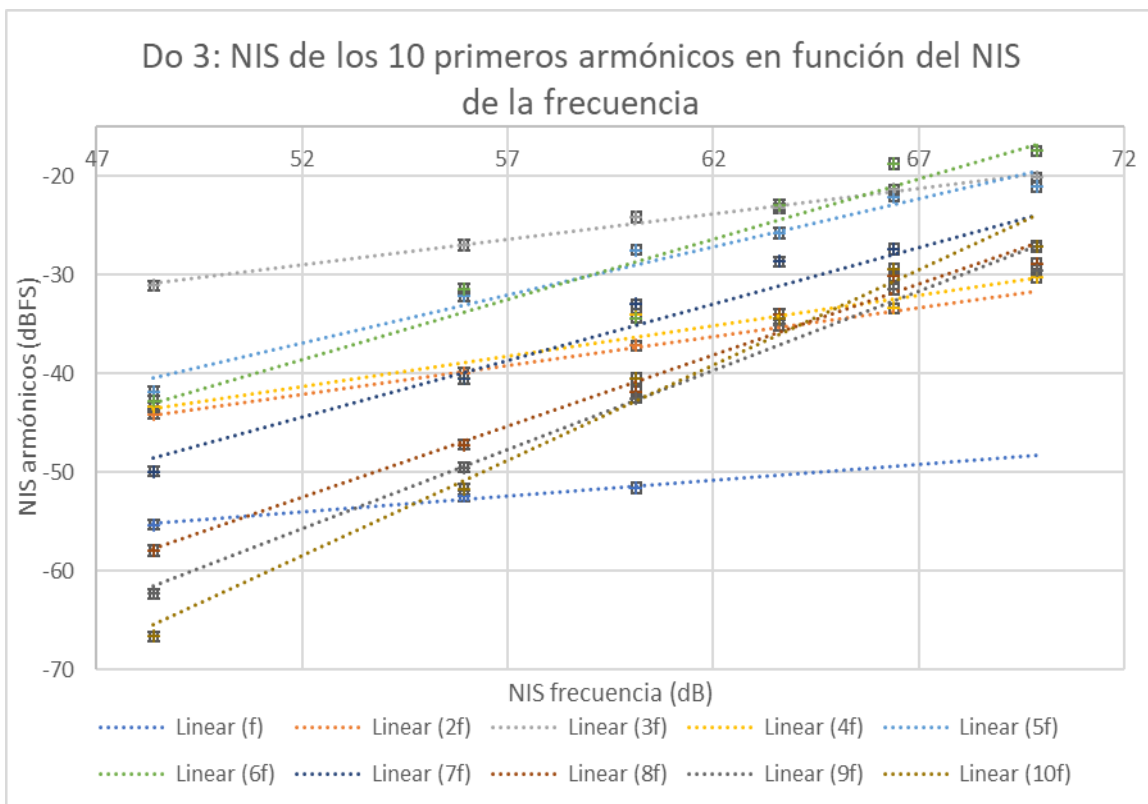
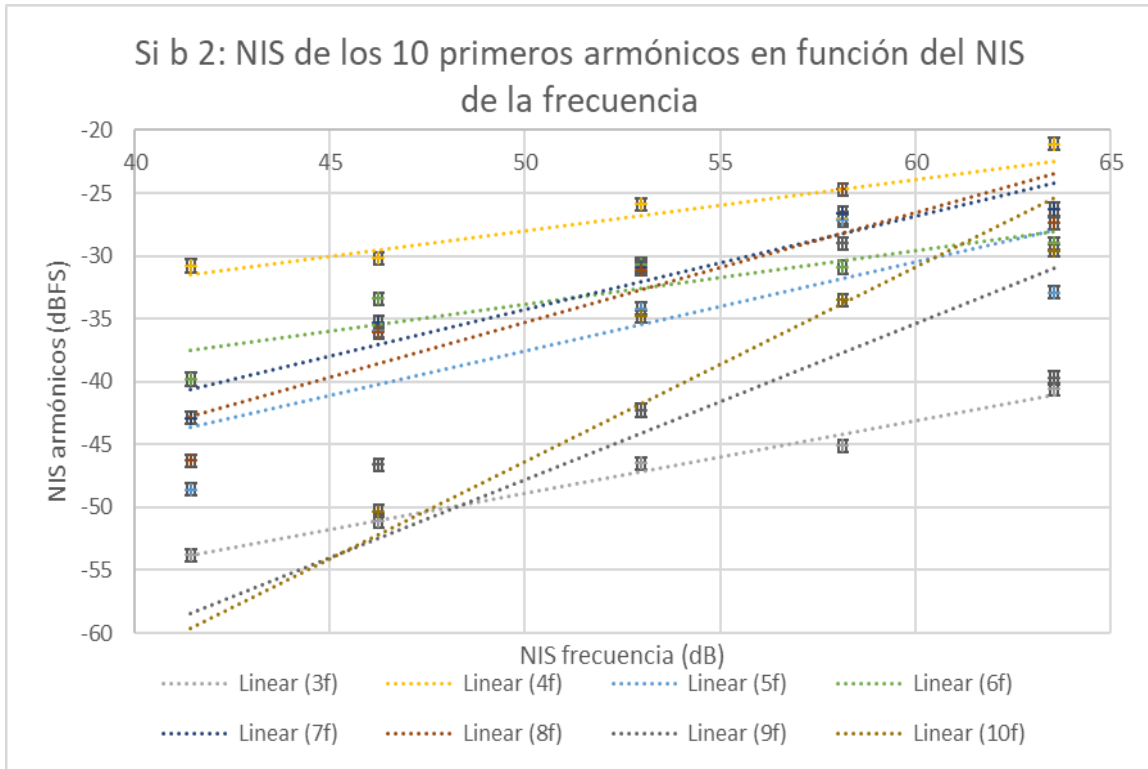


(De izquierda a derecha y de arriba a abajo) **Gráficos 30, 31, 32, 33, 34, 35.** Gráficos resultantes del análisis de espectro sonoro de la nota La 3 a NIS general de (48,97; 51,17; 57,88; 66,52; 73,22; 77,81) *dB* respectivamente.

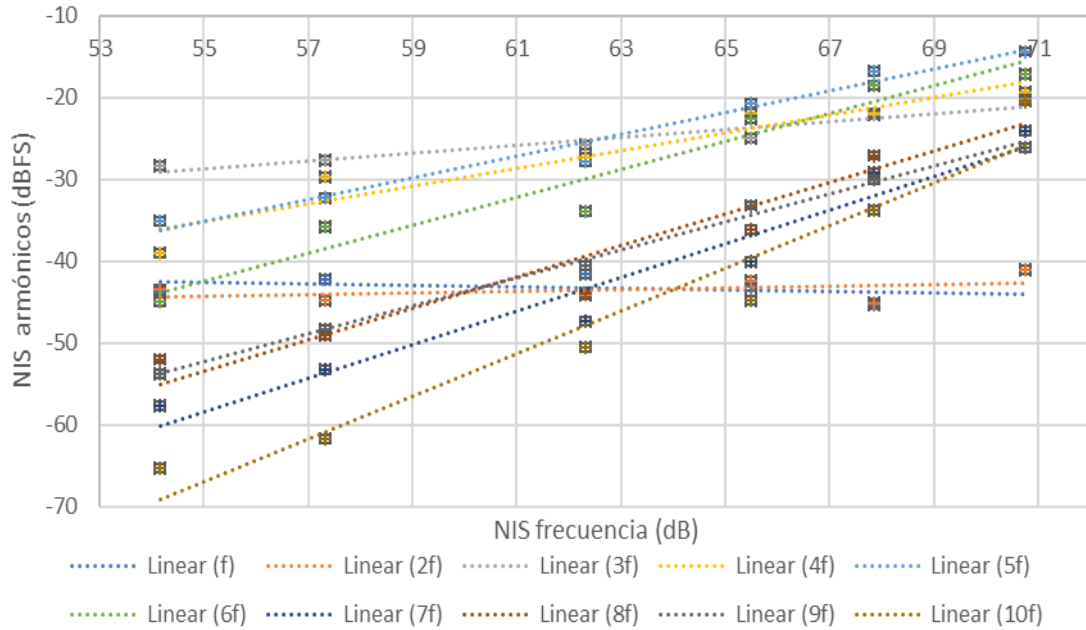


(De izquierda a derecha y de arriba a abajo) **Gráficos 36, 37, 38, 39, 40, 41.** Gráficos resultantes del análisis de espectro sonoro de la nota Si b 3 a NIS general de (55,93; 60,69; 62,39; 65,89; 67,64; 70,14) *dB* respectivamente.

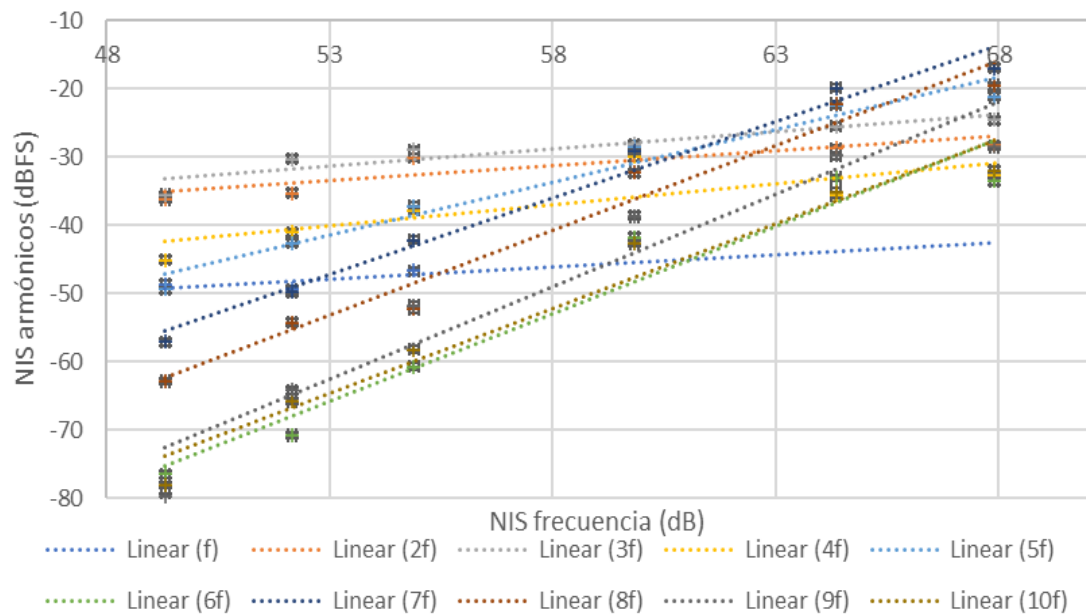
7.2. Gráficos: NIS de los 10 armónicos de la nota en función del NIS general de la frecuencia

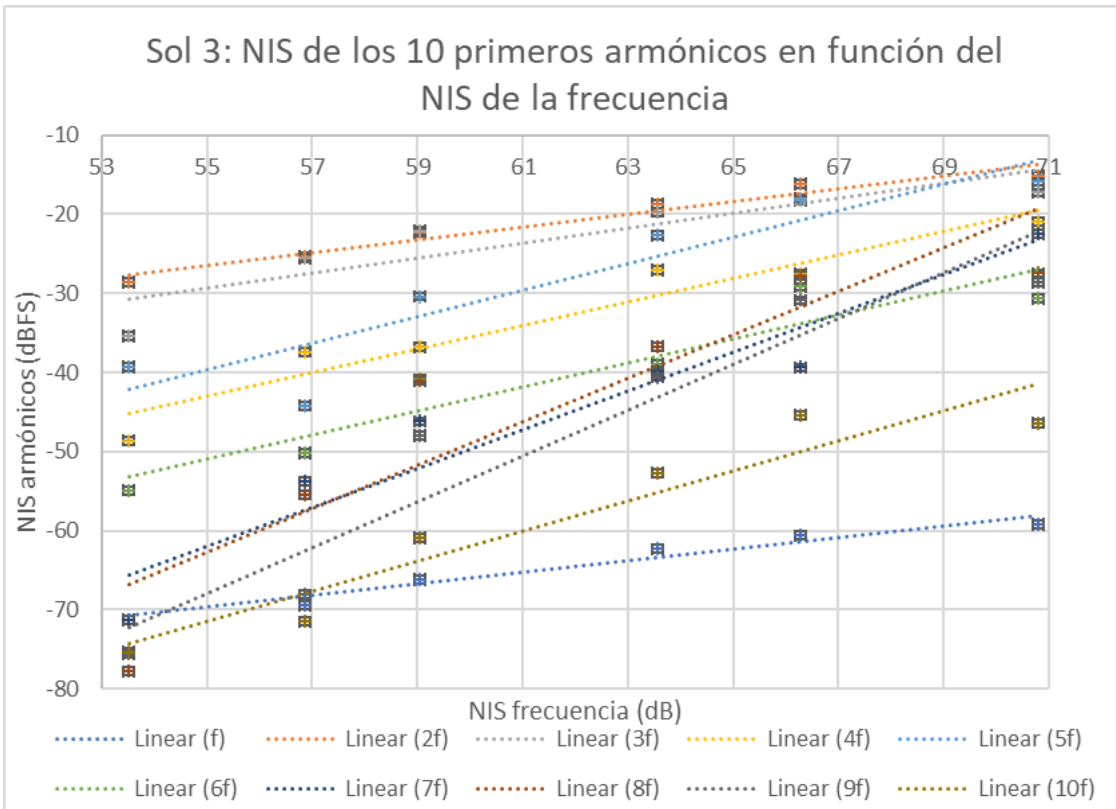
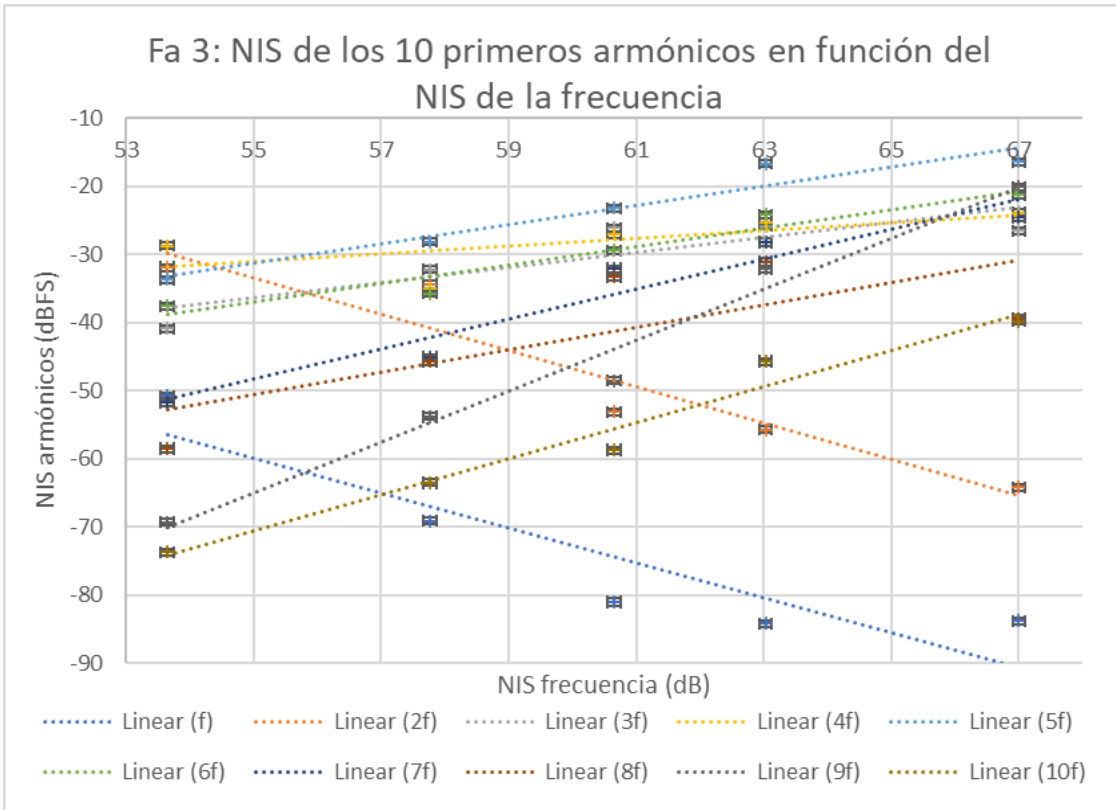


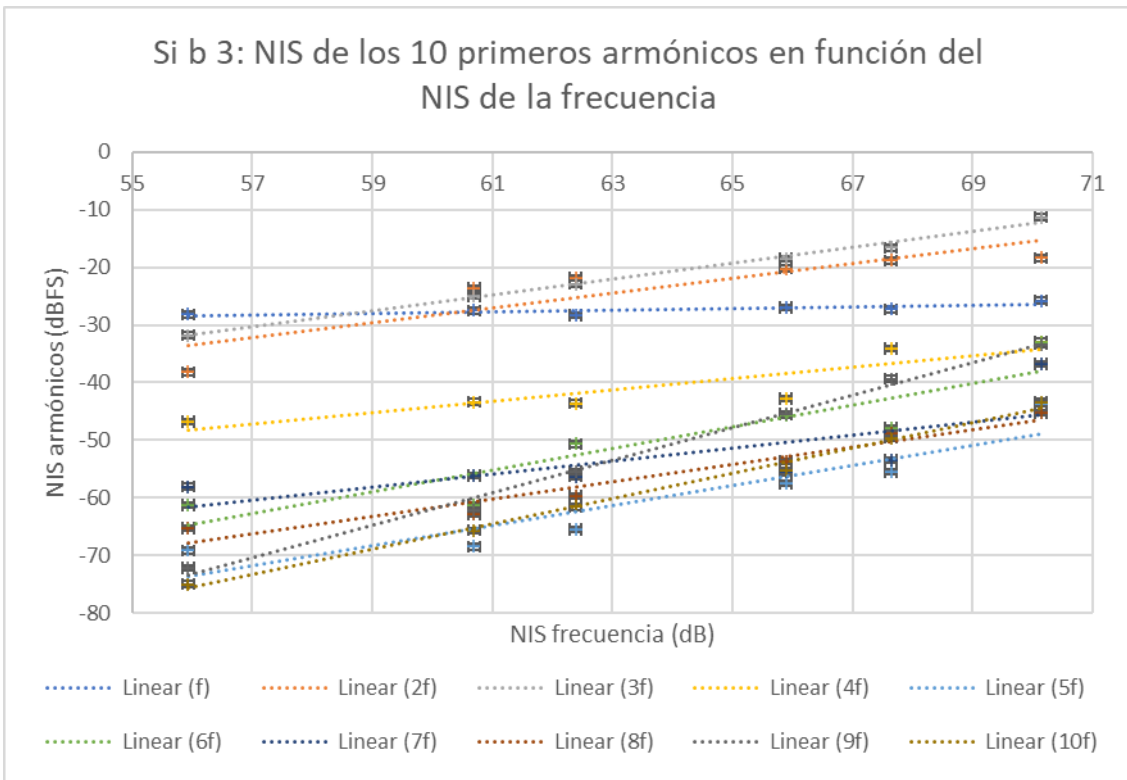
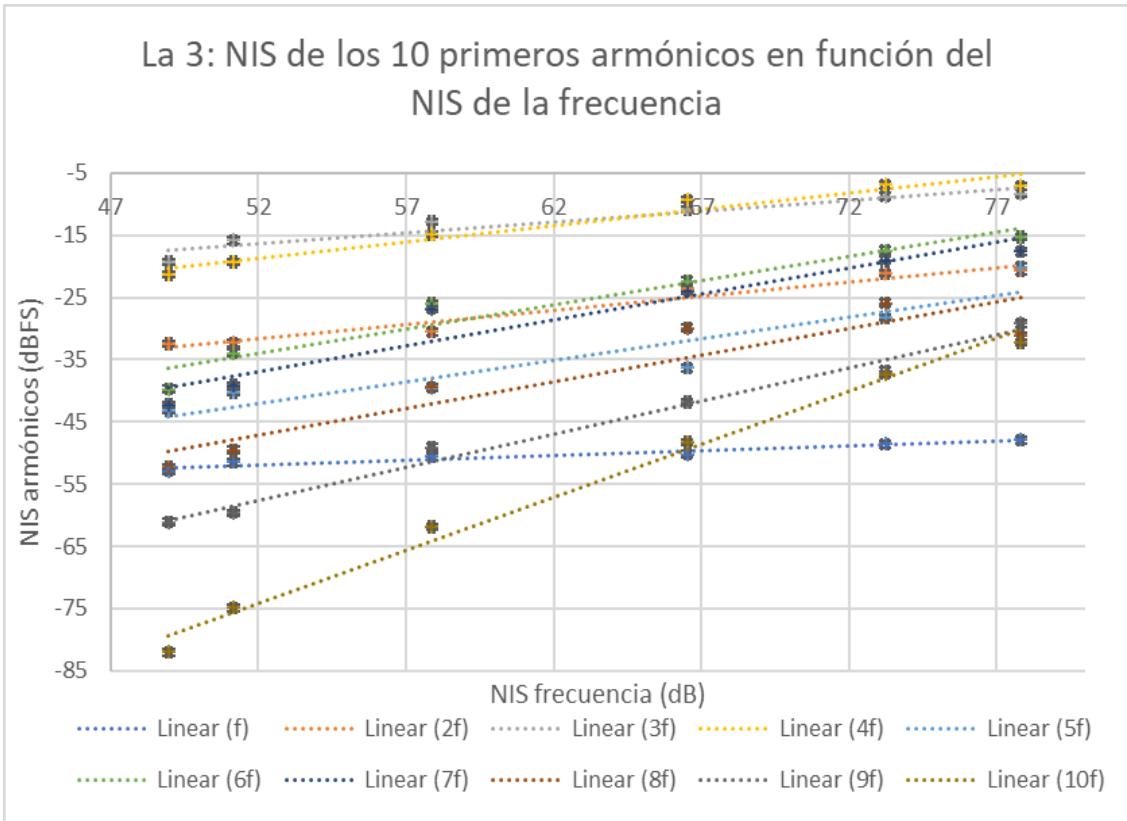
Re 3: NIS de los 10 primeros armónicos en función del NIS de la frecuencia



Mi b 3: NIS de los 10 primeros armónicos en función del NIS de la frecuencia

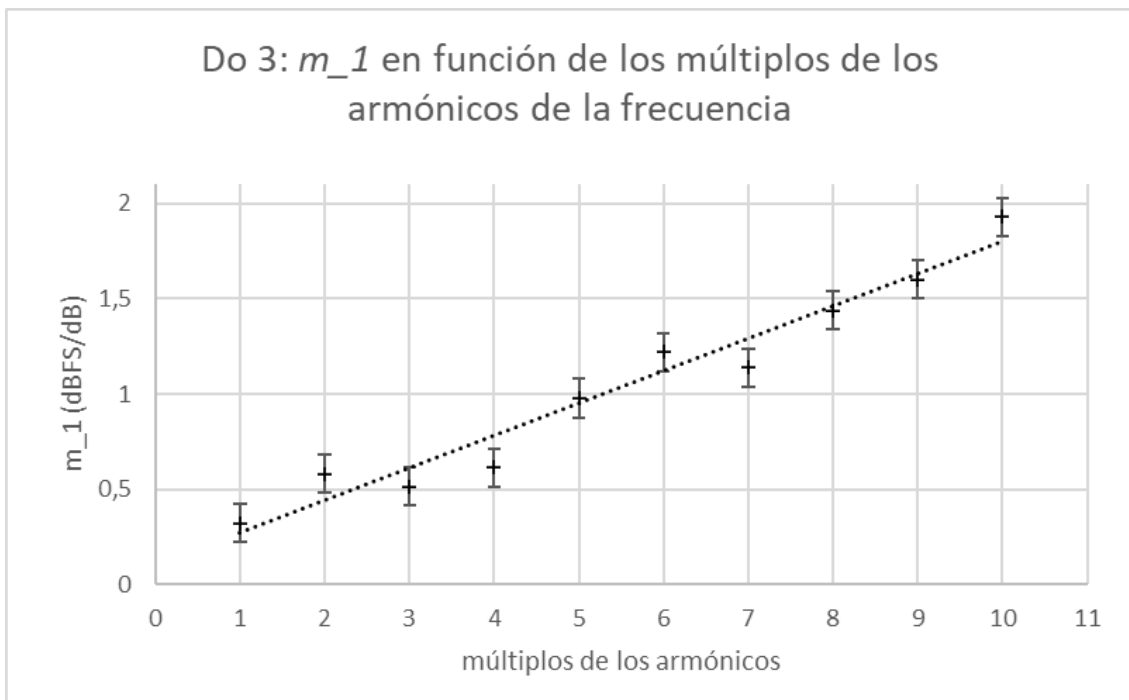
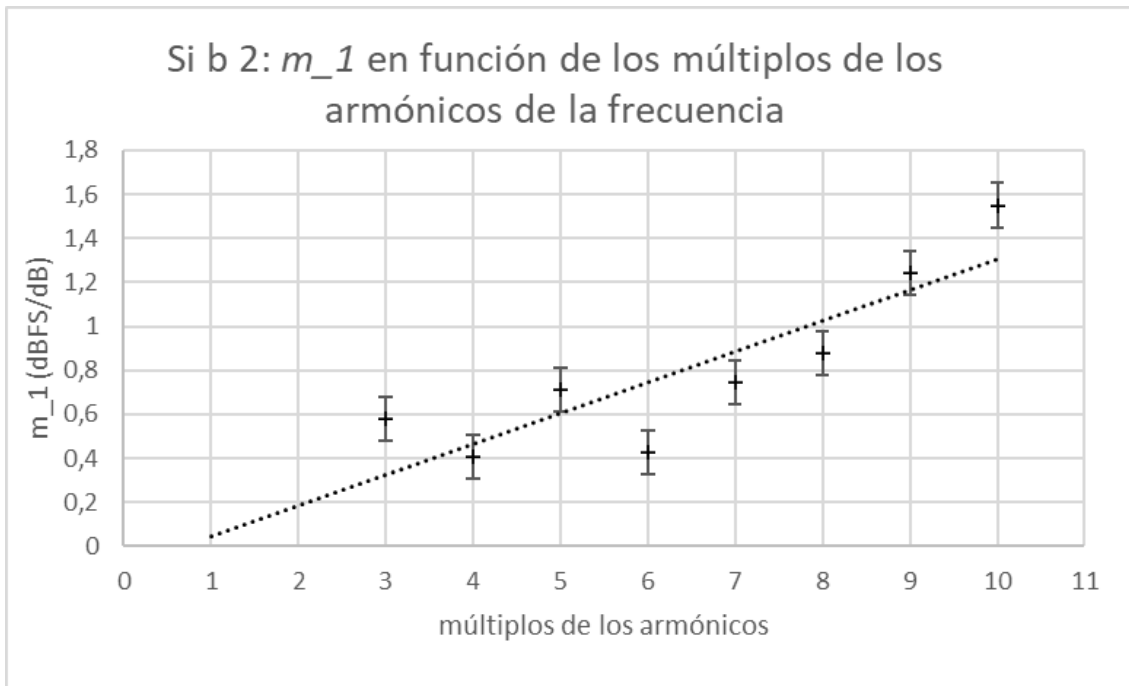




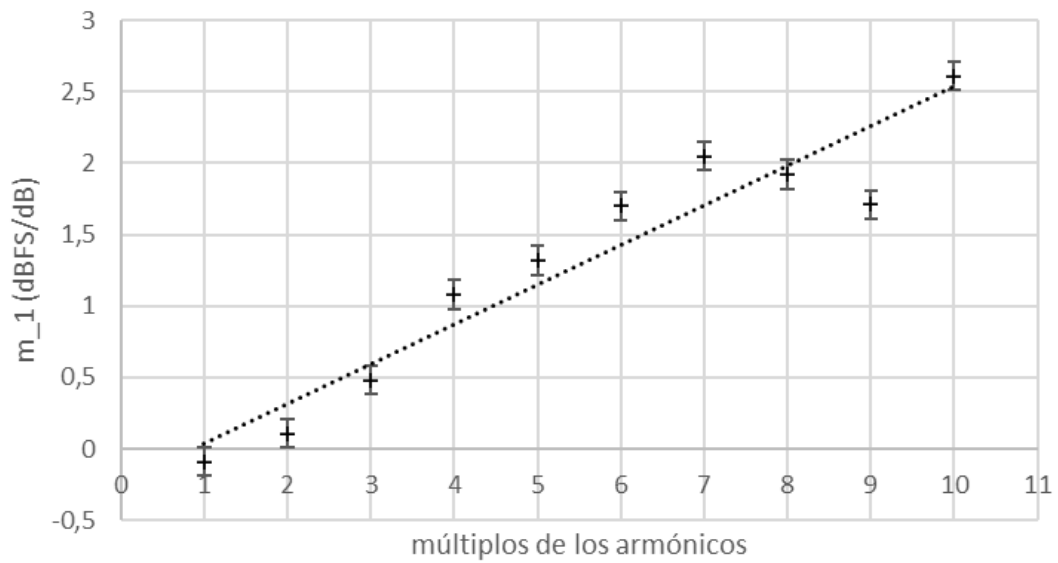


(De arriba a abajo) **Gráficos 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49.** Muestran la relación de los NIS de cada uno de los 10 armónicos con el NIS general de la frecuencia respectiva.

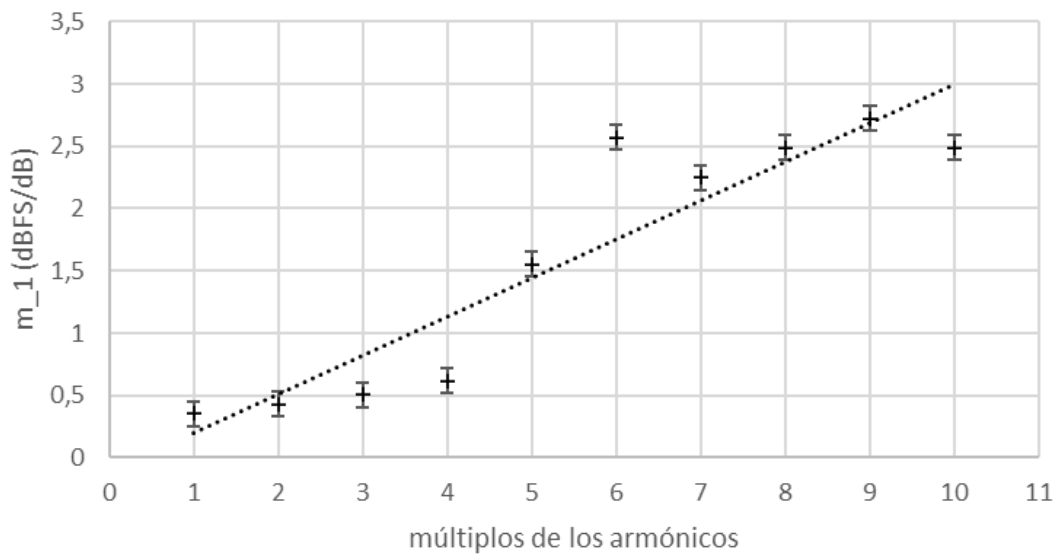
7.3. Gráficos: pendiente m_1 de los 10 armónicos de cada nota en función de los 10 armónicos múltiplos



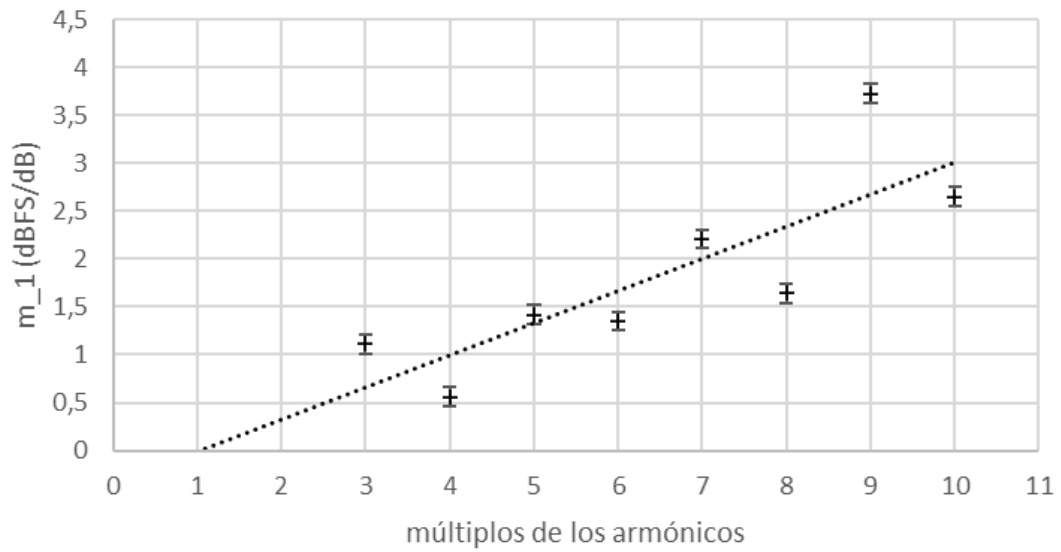
Re 3: m_1 en función de los múltiplos de los armónicos de la frecuencia



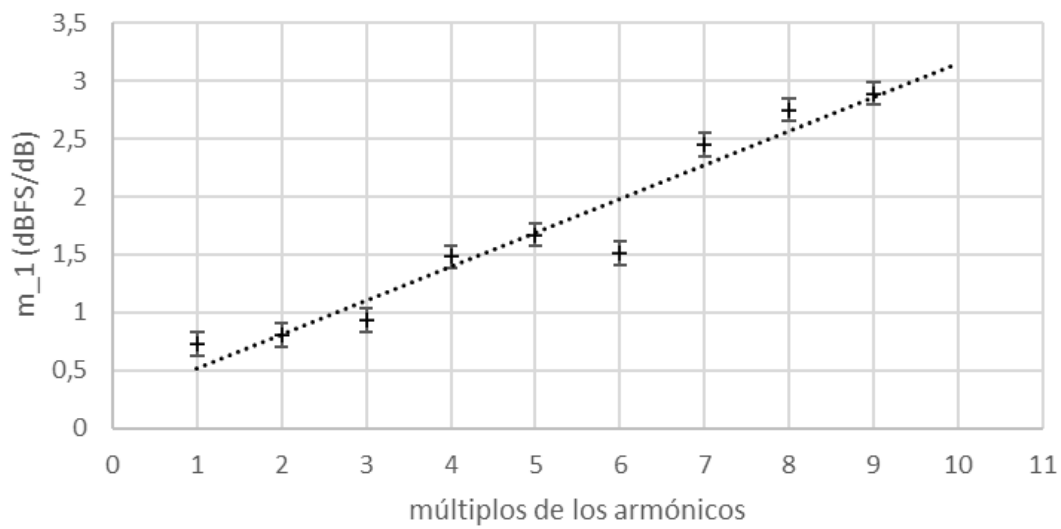
Mi b 3: m_1 en función de los múltiplos de los armónicos de la frecuencia



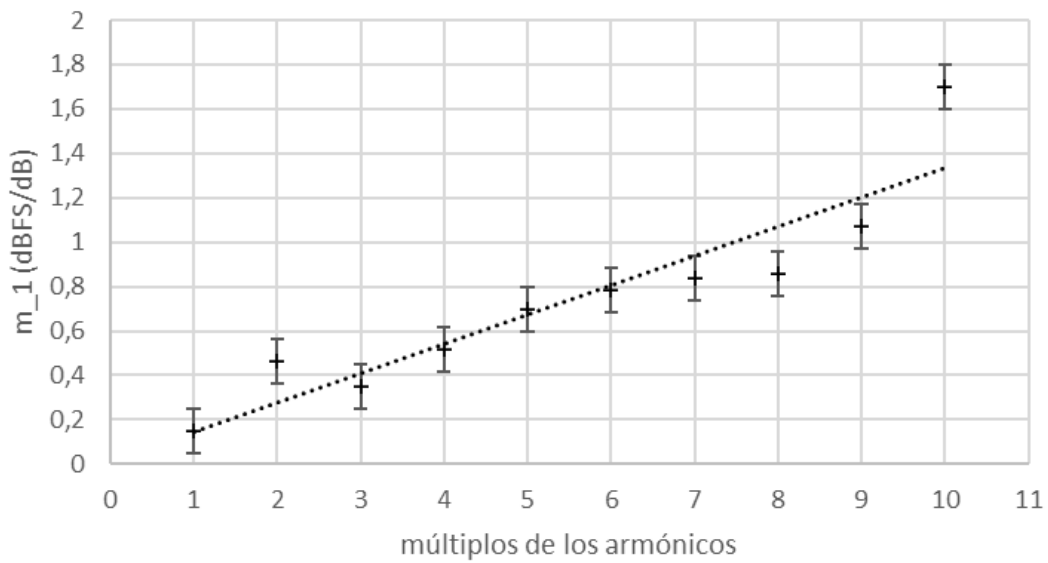
Fa 3: m_1 en función de los múltiplos de los armónicos de la frecuencia



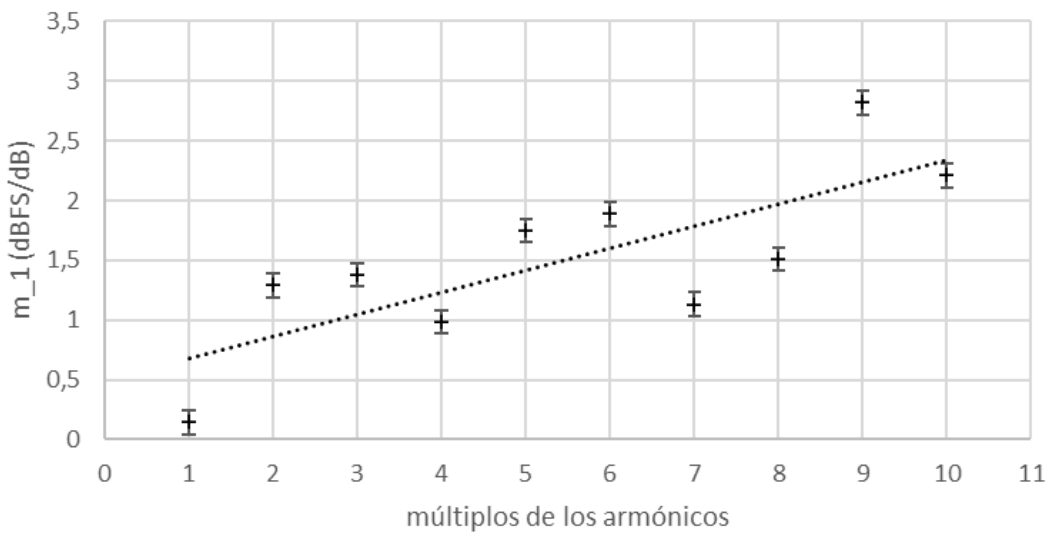
Sol 3: m_1 en función de los múltiplos de los armónicos de la frecuencia



La 3: m_1 en función de los múltiplos de los armónicos de la frecuencia



Si b 3: m_1 en función de los múltiplos de los armónicos de la frecuencia



(De arriba a abajo) **Gráficos 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57.** Muestran la relación de las pendientes m_1 con los múltiplos de los armónicos de la frecuencia concreta.