

# Bioacústica

Análisis de señales acústicas para su aplicación en ciencias biológicas

**Lucía Ziegler**

lucia.ziegler@gmail.com

**Martín Rocamora**

rocamora@fing.edu.uy

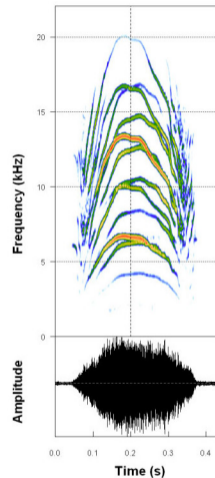
Programa de Formación de las Ciencias Básicas  
PEDECIBA

Junio 25, 2021

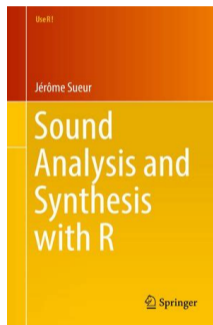


UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

- Dirigido principalmente a estudiantes interesados en el análisis de sonidos de animales.
- Se cubren principios básicos de visualización y análisis espectrográfico de sonido.



- Basado en el libro de Sueur †
- Programación en lenguaje R
- Software de audio (Audacity, Raven)
  
- Evaluación:
  - Tareas semanales (individual)
  - Proyecto final (individual)
- Página del curso:  
<https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?name=bioacustica>



---

† J. Sueur, *Sound analysis and synthesis with R*. Springer, 2018

¿Preguntas?

**1. Física del sonido**

**2. Grabación de audio**

**3. Audio digital**

## 1. Física del sonido

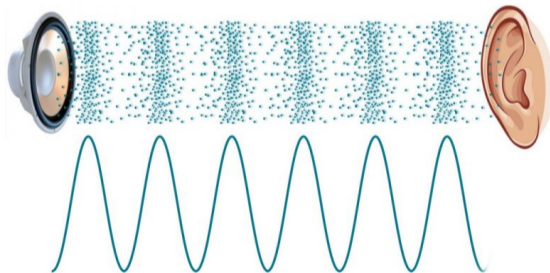
## 2. Grabación de audio

## 3. Audio digital

Desde el punto de vista **psicológico**, el **sonido** es una sensación percibida por el cerebro, generalmente asociada a la recepción de **ondas acústicas** por el oído.

Desde el punto de vista **físico**, el **sonido**, o más propiamente, la **onda acústica** o **señal acústica**, es un fenómeno que involucra la propagación de energía en forma de **ondas mecánicas** a través de un **medio elástico** (típicamente, el aire), generadas por el movimiento vibratorio de un cuerpo.

Según sus propiedades (e.g. frecuencia, intensidad, duración), la **señal acústica** puede ser audible.



- Las partículas de aire no se trasladan, se desplazan respecto a su posición de equilibrio.
- En un medio elástico como el aire la propagación de ondas es longitudinal.



- El aire como medio elástico se considera
  - lineal - la superposición de ondas es lineal
  - homogéneo - no hay direcciones de propagación privilegiadas
  - no dispersivo - todas las ondas se propagan a la misma velocidad

$$c \approx 331,4 \sqrt{1 + \frac{t}{273,15}} \text{ m/s}$$

dónde  $c$  es la velocidad de propagación del sonido y  $t$  es la temperatura en grados Celsius.



**Presión sonora:** Variación de presión del aire debido a la presencia de señales acústicas.

- presión atmosférica  $\approx 100.000$  Pa
- mínima variación perceptible  $\approx 20 \mu\text{Pa}$
- máxima variación perceptible  $\approx 20$  Pa

$$P_{\text{sonora}} = P_{\text{aire}} - P_{\text{atm}}$$

- rango de variación muy grande
- la percepción no es lineal, sino aproximadamente logarítmica

El **nivel de presión sonora** (NPS) de una señal acústica mide, en escala logarítmica, la relación entre su presión sonora  $P$  y una presión sonora de referencia  $P_{\text{ref}}$  en dB ( $P_{\text{ref}} = 20\mu\text{Pa}$ ).

$$NPS (dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{sonora}}}{P_{\text{ref}}} \right)$$

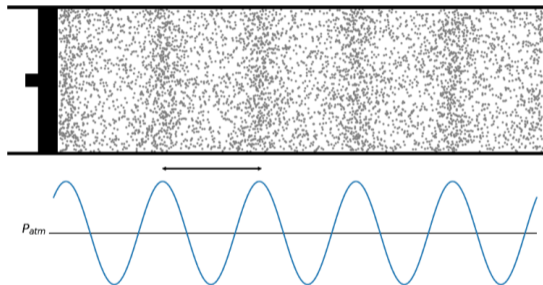
- $NPS_{\text{min}} = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{ref}}}{P_{\text{ref}}} \right) = 0$  dB
- $NPS_{\text{max}} = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{ref}}} \right) = 120$  dB

## Ondas periódicas

- frecuencia  $f$  :  
cantidad de ciclos por segundo (Hz)
- período  $T$  :  
tiempo para completar un ciclo (s)
- longitud de onda  $\lambda$  :  
distancia recorrida en un período (m)

$$f = \frac{1}{T}$$

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$



- Desplazamiento  $x$  (m): de la partícula respecto a su posición de equilibrio

- Velocidad  $v$  (m/s): variación de desplazamiento por unidad de tiempo

$$v(t) = \frac{\partial x}{\partial t}$$

- Aceleración  $a$  (m/s<sup>2</sup>): cambio de velocidad por unidad de tiempo

$$a(t) = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

- Segunda ley de Newton: relación entre fuerza ( $F$ ), masa ( $m$ ) y aceleración ( $a$ )

$$F = m \times a$$

- Presión  $p$  (Pa): cantidad de fuerza por unidad de superficie ( $S$ )

$$p = \frac{F}{S}$$

- Sustituyendo

$$p(t) = \frac{m}{S} \times \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

- Consideremos un sistema simple, un diapasón ideal, que da lugar a un **movimiento armónico simple**.
- Es producto de la interacción de dos fuerzas de sentido contrario: la fuerza elástica y la inercia.
- La fuerza elástica es proporcional al desplazamiento  $x$  (dónde  $k$  es constante de elasticidad).

$$F = -k x$$

- Segunda ley de Newton

$$F = m a = -k x \implies a = -\frac{k}{m} x$$

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{k}{m} x$$

- Las funciones seno y coseno la verifican

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{k}{m} x$$

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} \sin(\omega t) = -\omega^2 \sin \omega t$$

- Solución

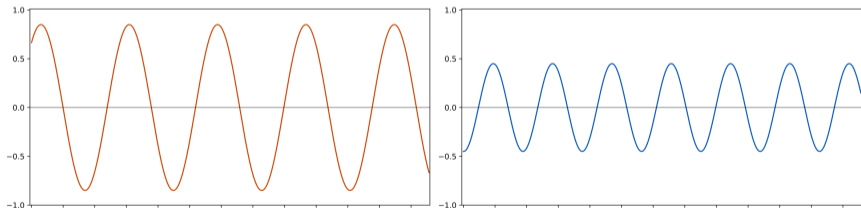
$$x(t) = \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \sin(\omega t) = \omega \cos \omega t$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \cos(\omega t) = -\omega \sin \omega t$$

$$\begin{aligned}x(t) &= A \sin(\omega t + \varphi) \\ &= A \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi\right) \\ &= A \sin(2\pi f t + \varphi)\end{aligned}$$

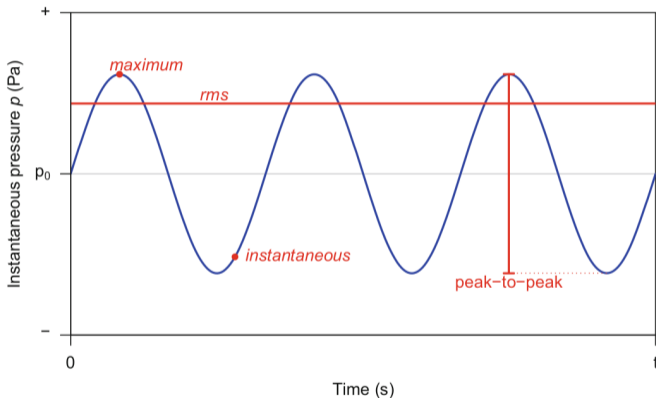
- $A$  amplitud
- $f$  frecuencia (Hz)
- $\varphi$  fase inicial

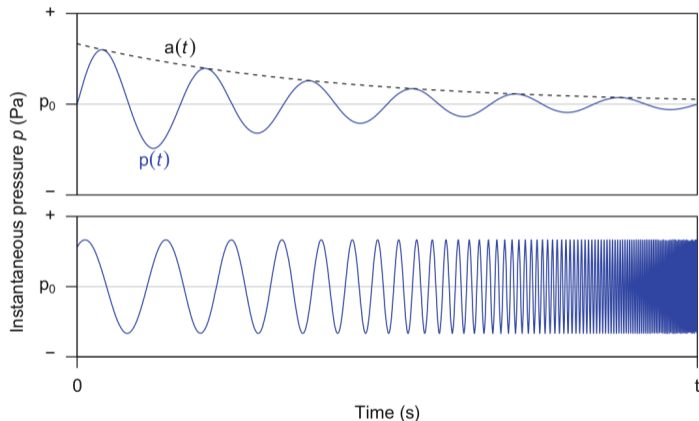




- Amplitud máxima ( $A$ )
- Amplitud instantánea
- Amplitud pico a pico
- Amplitud RMS  
(valor cuadrático medio)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$





$$p(t) = Ae^{-\beta t} \sin(2\pi ft + \varphi)$$

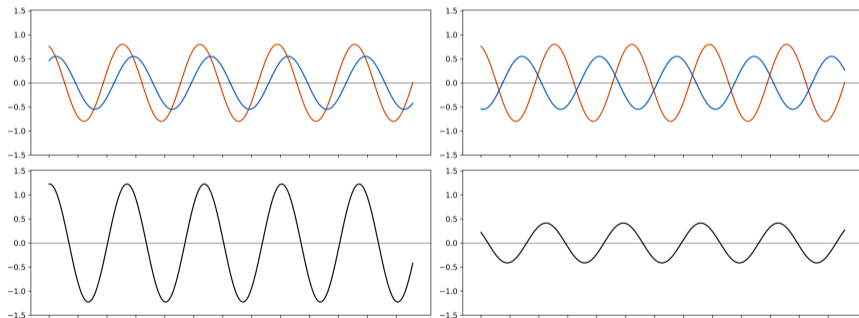
$$p(t) = A \sin(2\pi(ft + ct^2) + \varphi)$$

Superposición de ondas sonoras.

- En un medio lineal como el aire, el resultado de la superposición es la suma algebraica de los componentes.

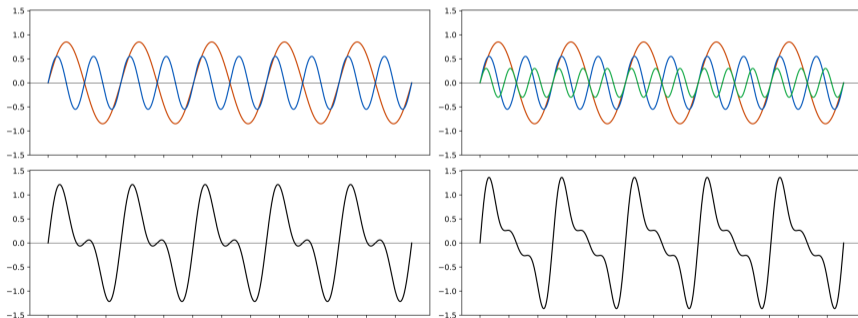
Superposición de ondas sinusoides de igual frecuencia.

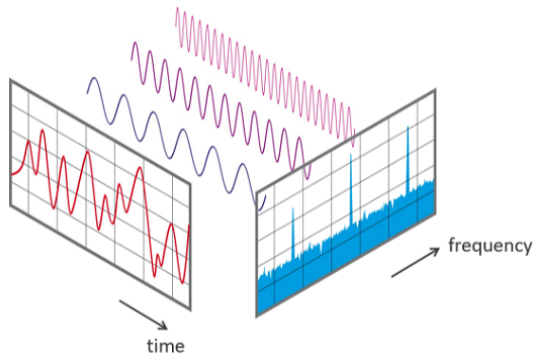
- Onda resultante es otra sinusoidal de igual frecuencia.
- Su amplitud y fase dependerán de la relación de amplitudes y fases de los componentes.

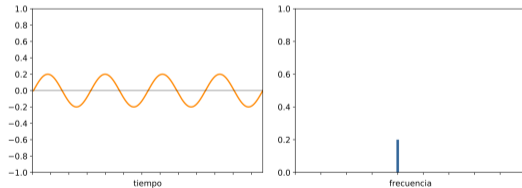
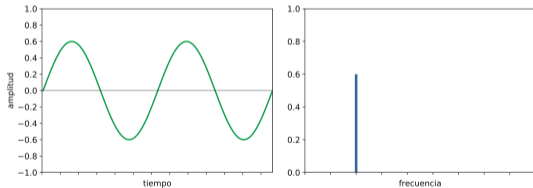
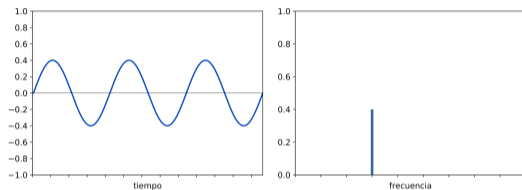
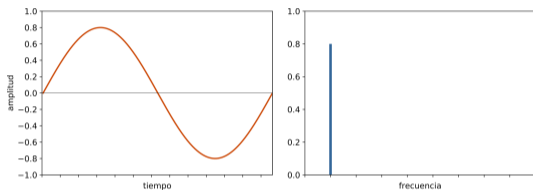


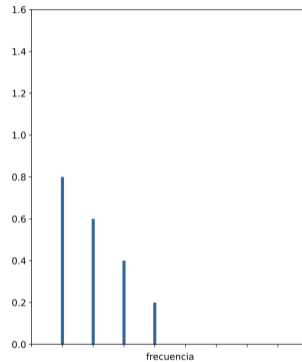
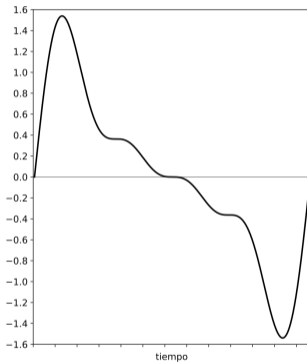
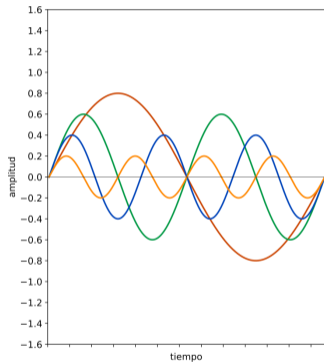
Superposición de ondas sinusoides en relación armónica.

- Frecuencia fundamental  $f_0$  (máximo común divisor).
- Armónico  $k$ -ésimo de frecuencia  $f_k = kf_0$ .
- Onda resultante es periódica de frecuencia  $f_0$ .

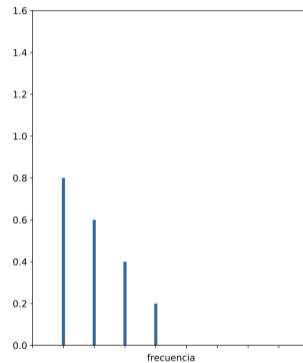
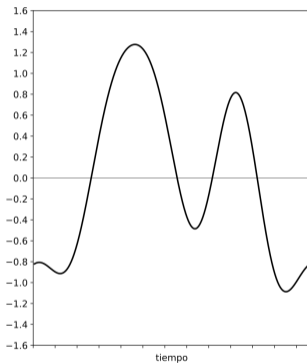
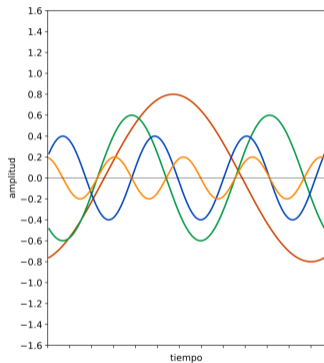












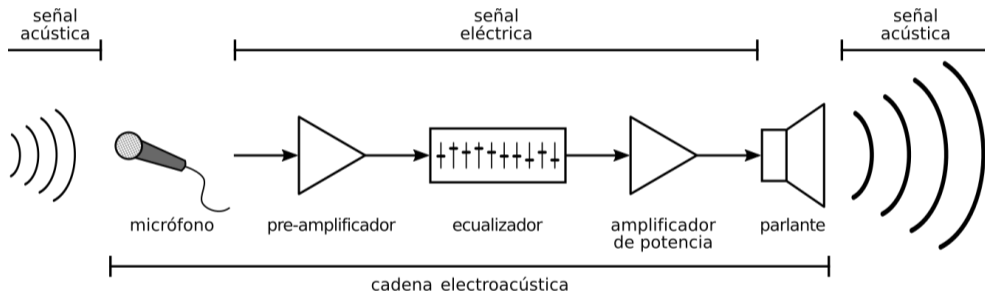
¿Preguntas?

1. Física del sonido

**2. Grabación de audio**

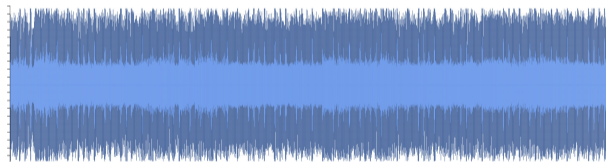
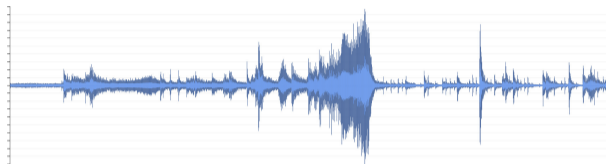
3. Audio digital





El **rango dinámico (RD)** de una señal es la relación entre sus niveles de amplitud máximo y mínimo. Se expresa en dB.

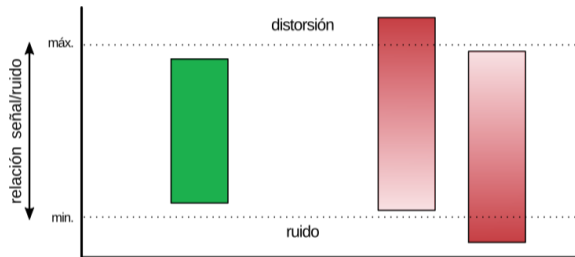
$$RD (dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{RMS_{max}}{RMS_{min}} \right)$$



Señal con rango dinámico amplio (arriba) y bajo (abajo).

La **relación señal a ruido** de un equipo es la relación entre el nivel de amplitud máximo de señal que puede representar sin distorsionarla, y el nivel de ruido inherente al equipo. Se expresa en dB.

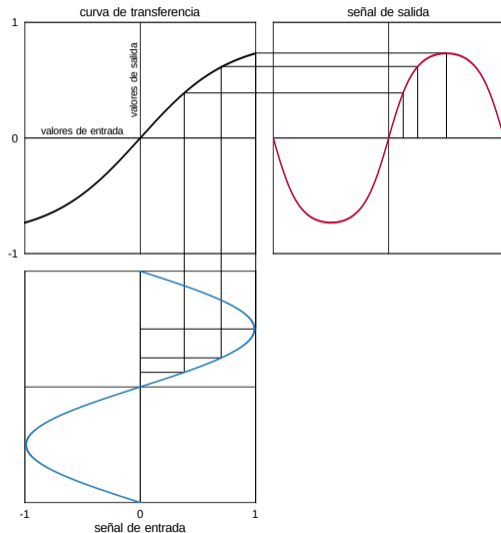
$$SNR (dB) = 20 \log_{10} \left( \frac{RMS_{señal}}{RMS_{ruido}} \right)$$



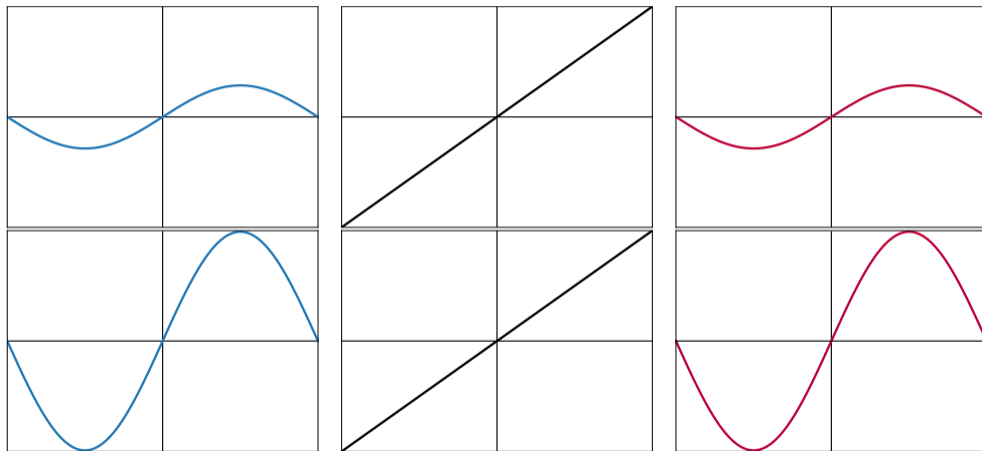
La **función de transferencia** de un dispositivo establece el valor de la señal de salida para cada valor de la señal de entrada.

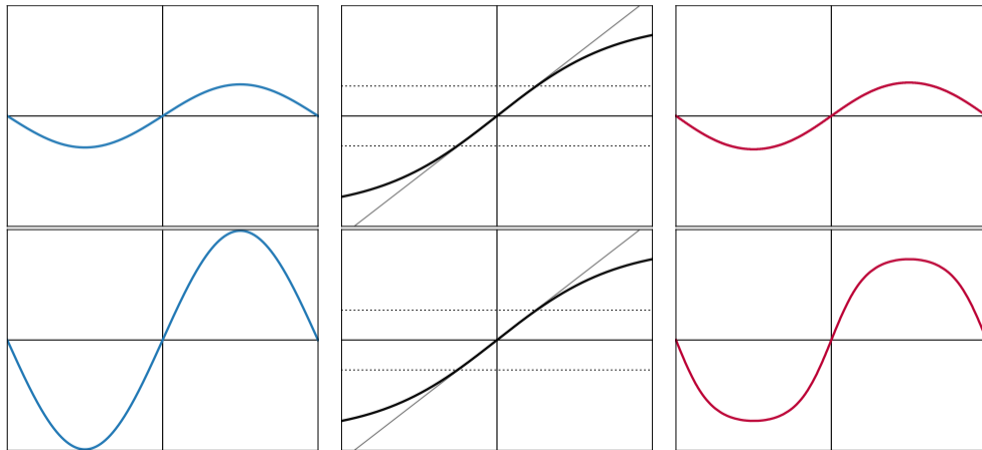
Suele representarse gráficamente mediante una **curva de transferencia**.

Cuando las amplitudes exceden la zona lineal se produce **distorsión**.



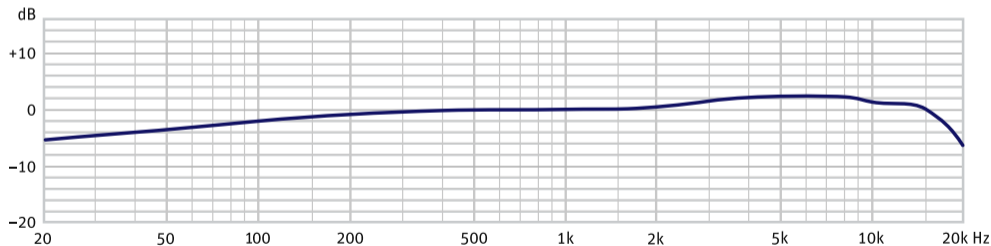






Un sistema lineal puede alterar la **amplitud** y la **fase** de cada componente de distinta forma.

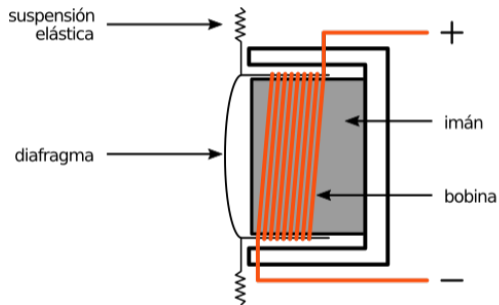
La **respuesta en frecuencia** de un dispositivo es la función que representa la magnitud (o fase) de la señal de salida, en función de su frecuencia, en comparación con la de la señal de entrada.





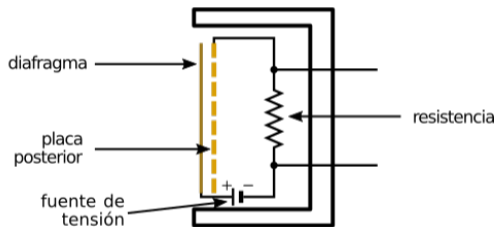
En los **micrófonos dinámicos** o de **bobina móvil**, las variaciones de presión de la onda sonora son captadas por una membrana o diafragma, que pone en movimiento una bobina ubicada alrededor de un imán.

Por inducción electromagnética, este movimiento genera un voltaje (fuerza electromotriz).



En los micrófonos **capacitivos** o de **condensador**, el diafragma funciona como la placa móvil de un condensador. Las variaciones de voltaje se generan al variar la distancia respecto a la placa fija posterior.

El condensador necesita una fuente de tensión constante, que puede ser una pila interna, o una fuente fantasma (**phantom power**) a través del cable.



La **sensibilidad** de un micrófono es el cociente entre el voltaje de salida (en V o mV) y la presión de entrada (Pa).\*

$$S = \frac{V}{p}$$

Suele expresarse en dBV, relativo a una sensibilidad de referencia de 1V/Pa.

$$S_{\text{dBV}} = 20 \log_{10} \left( \frac{S}{S_{\text{ref}}} \right)$$

La sensibilidad varía en función de:

- la frecuencia de la señal
- el ángulo de incidencia de la señal respecto a la orientación del micrófono

Para cada micrófono esto se representa con su:

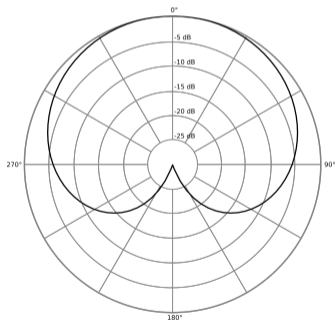
- respuesta en frecuencia
- patrón de directividad

---

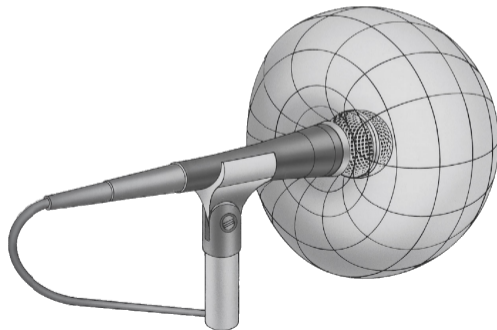
\*La señal estándar para hacer la medición es una sinusoidal de 1 kHz y presión 1 Pa (94 dB NPS).

La **directividad** de un micrófono describe cómo varía su **sensibilidad** en función de la dirección de incidencia de la onda sonora, en relación al eje de orientación del micrófono.

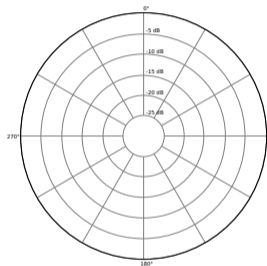
Se representa mediante su **patrón polar**. La sensibilidad efectiva de un micrófono varía para diferentes frecuencias. Lo que da lugar a patrones algo diferentes para las distintas frecuencias.



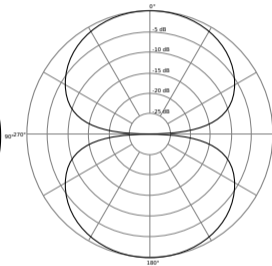
Patrón cardiode



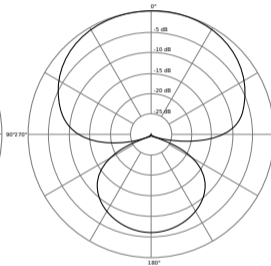




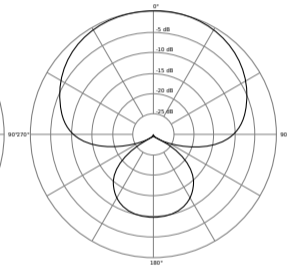
Patrón omnidireccional



Patrón figura ocho

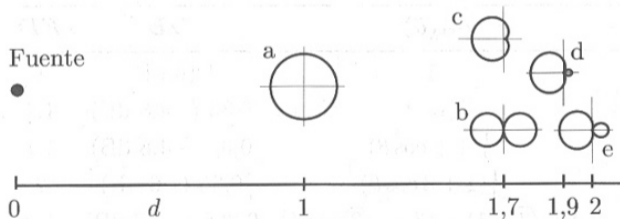


Patrón hipercardiode



Patrón supercardiode

El **factor de distancia** indica cuánto se debe alejar un micrófono para que capte la misma relación entre sonido directo y sonido ambiente que un micrófono omnidireccional.



a: omnidireccional; b: figura de ocho; c: cardioide; d: supercardioide; e: hipercardioide



¿Preguntas?

# Actividad

Para el conjunto de archivos de audio provisto.

Identificar fuentes de ruido (eléctrico y acústico).

Analizar aspectos vinculados con el rango dinámico.

1. Física del sonido

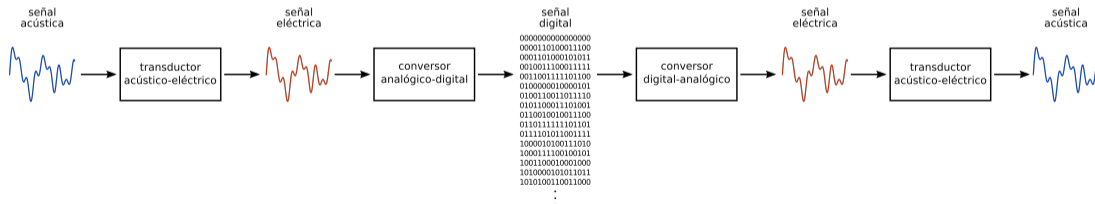
2. Grabación de audio

**3. Audio digital**

Una **señal de audio digital** consiste en una secuencia de números, que representan los valores instantáneos de amplitud de la señal, cada intervalos regulares de tiempo.

Los sistemas digitales de audio introducen dos nuevos procesos en la cadena electroacústica:

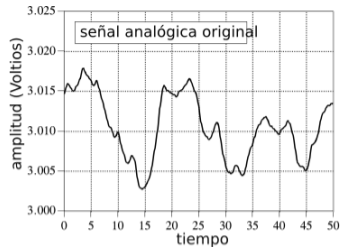
- conversión analógico/digital (A/D) y
- conversión digital/analógico (D/A).



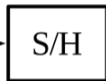
La digitalización de una señal analógica continua en una señal discreta se realiza mediante:

1. **Muestreo:** se mide del valor de la señal analógica a intervalos regulares de tiempo y se mantiene hasta la siguiente medición; se pasa de tiempo continuo a tiempo discreto.
2. **Cuantización:** se redondea del valor obtenido a una escala numérica discreta; se pasa de amplitud continua a amplitud discreta.

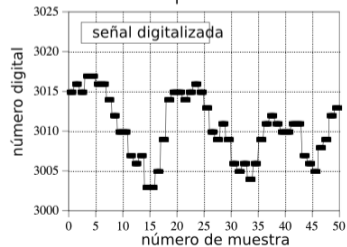
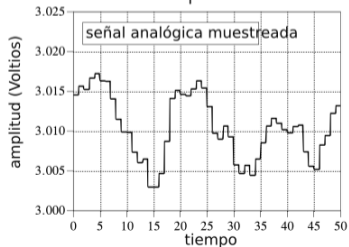




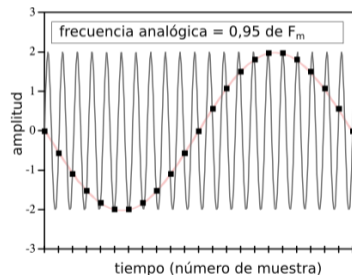
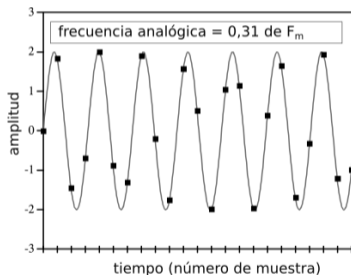
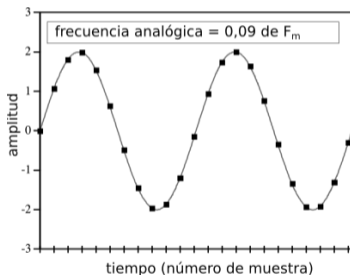
entrada analógica



salida digital



**Muestreo:** La señal analógica se muestrea a intervalos regulares de tiempo, determinados por la frecuencia de muestreo ( $F_m$ ). El comportamiento de la señal entre muestras no es registrado.



El **teorema de muestreo** o **teorema de Nyquist** establece que la señal analógica se puede reconstruir sin pérdida si su ancho de banda  $B$  es menor a la mitad de la frecuencia de muestreo  $F_m$ .

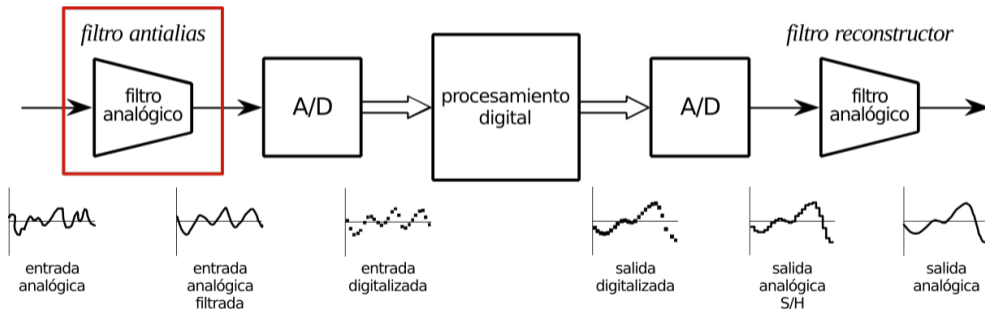
$$B < F_m/2$$

La frecuencia de muestreo debe ser más del doble de la frecuencia más alta presente en la señal.

$$F_m > 2 \times F_{\max}$$

Las frecuencias superiores a  $F_m/2$  (frecuencia de Nyquist) se reflejan respecto a esa frecuencia, dando lugar a frecuencias alias.

Para evitar las frecuencias alias, la señal analógica se hace pasar por un filtro pasa bajos con frecuencia de corte  $F_m/2$  antes de ser digitalizada.



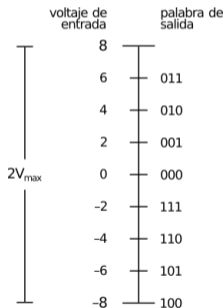
**Cuantización:** es la aproximación de la amplitud continua a valores de amplitud discreta.

La cantidad de números binarios que se pueden representar con palabras de  $N$  bits es  $2^N$ .

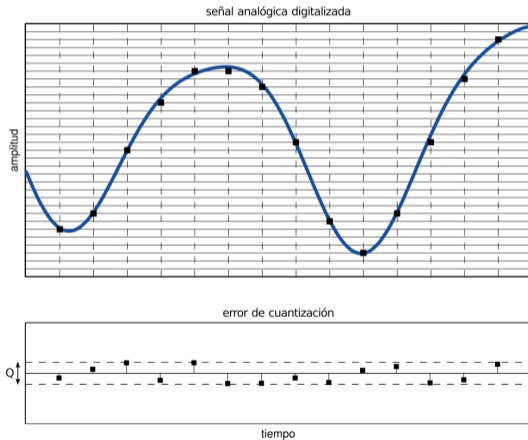
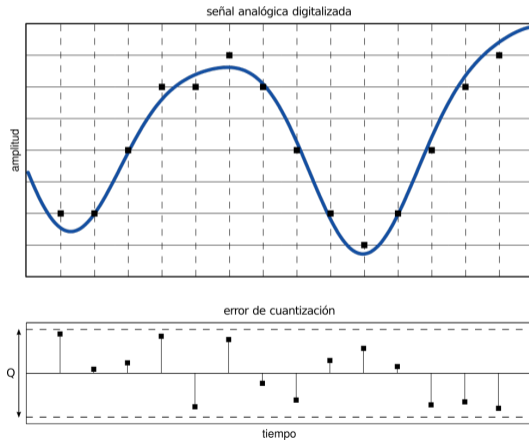
Se divide el rango máximo de amplitud entre la cantidad de niveles, y a cada nivel de cuantización se le asigna una palabra binaria.

$N$	niveles
3	8
8	256
16	65536
24	16777216

La resolución  $Q$  es la diferencia de valor entre dos niveles de cuantización adyacentes; surge de dividir el rango total de voltaje del sistema por la cantidad de niveles.



El **error de cuantización** es la diferencia entre el valor real de la señal de entrada, y el valor de la señal cuantizada. Disminuye al aumentar la resolución, ya que  $-\frac{Q}{2} < \text{error} < \frac{Q}{2}$ .



El error de cuantización se percibe como ruido y en algunos casos como distorsión.

Considerando el error de cuantización como ruido aditivo, la relación señal a ruido en dB de una señal digital de  $N$  bits se calcula como:

$$SNR (dB) \approx 6,02 \times N$$

Por lo tanto, la relación señal ruido mejora al aumentar el largo de palabra  $N$ .

Los dos parámetros que determinan la fidelidad de la digitalización son:

- Frecuencia de muestreo ( $F_m$ ): que determina el ancho de banda.

$$B < F_m/2$$

- Número de bits ( $N$ ): que determina la relación señal a ruido.

$$SNR(dB) \approx 6,02 \times N$$



## Codificación de audio

- Sin compresión: se almacenan directamente las muestras originales en PCM (wav).
- Compresión con pérdidas: explota irrelevancia perceptiva para descartar información (MP3).
- Compresión sin pérdidas: explota la redundancia y se reconstruye el audio original (FLAC).

¿Preguntas?

# Actividad

Para el conjunto de archivos de audio provisto.

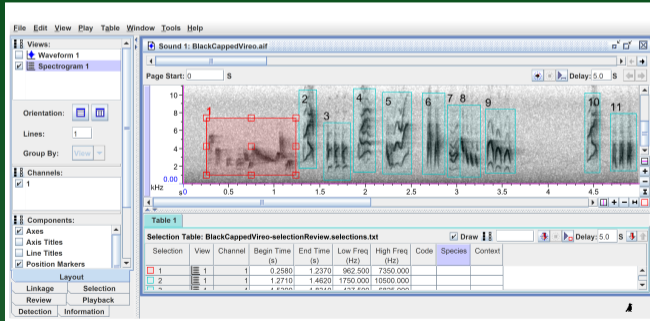
Identificar tipo de codificación de audio.

Identificar los parámetros de la digitalización.

# Actividad

Seguir los tutoriales de los videos 2 y 3 para hacer anotaciones en Raven.

<https://ravensoundsoftware.com/video-tutorials/>





J. Sueur, *Sound analysis and synthesis with R*.  
Springer, 2018.



M. Rocamora and L. Jure, "Presentaciones de clase del curso de Acústica Musical." Escuela Universitaria de Música, Universidad de la República, Uruguay, 2021.  
<http://www.eumus.edu.uy/eme/ensenanza/acustica/presentaciones/>.