

INFORME 11: MEDICIÓN DEL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN DE UNA MUESTRA

Alejo Cohen

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: cohen51134@estudiantes.untref.edu.ar

Matías Di Bernardo

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: matias.di.bernardo@hotmail.com

Martín Haimovich

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: haimo100@hotmail.com

Leonardo Sandez

Universidad Nacional de Tres de Febrero, Ingeniería de Sonido, Caseros, Buenos Aires, Argentina
email: Leito.-mdp@hotmail.com

En este trabajo se mide el coeficiente de absorción de paneles acústicos siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ISO 354. Dentro de las limitaciones del método, la medición se realizó en un aula que no cumple con los requisitos de una cámara reverberante, y la superficie de muestra utilizada (3,47 m²) fue menor a la requerida por la norma. A pesar de estas limitaciones, se obtuvieron coeficientes de absorción de entre 0,6 y 0,75 por encima de 1 kHz y valores más elevados entre 160 y 630 Hz, que evidencian una sobreestimación debida al efecto de borde.

Keywords: Coeficiente de absorción, ISO 354, Efecto de borde.

1. Introducción

El fenómeno de absorción se produce cuando la energía sonora incide sobre una superficie y parte de esta es absorbida por el material. Cuánta energía se absorbe depende de las características del material y de la longitud de la onda incidente. Conocer los coeficientes de absorción de las superficies en un recinto permite predecir el comportamiento del campo sonoro en dicho espacio, siendo determinantes en el tiempo de reverberación de la sala.

En este informe se detalla el procedimiento llevado a cabo para la medición del coeficiente de absorción de un conjunto de paneles fonoabsorbentes rectangulares, siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ISO 354 [1]. Las mediciones se realizaron en un aula de la Universidad Nacional de Tres de Febrero y, posteriormente, se analizaron los resultados considerando las limitaciones tanto del recinto como del tamaño de la muestra utilizada.

2. Marco Teórico

2.1. Tiempo de Reverberación

El tiempo de reverberación (TR) es el tiempo que tarda el nivel de presión sonora en decaer 60 dB una vez que se apaga la fuente emisora. Este indicador permite describir cómo disminuye la energía sonora en el tiempo dentro de un recinto determinado, siendo de gran utilidad para caracterizarlo acústicamente. Dado que lograr registrar una caída completa de 60 dB puede ser difícil debido al ruido de fondo, en la práctica se suelen utilizar rangos de disminución más cortos, a partir de los cuales se estima el T60. Se definen el T20 y T30 como los tiempos en que la energía disminuye desde los -5 dB a los -25 dB y -35 dB respectivamente, y se extrapolan mediante una recta a los 60 dB de caída. Asimismo, el Early Decay Time (EDT) extrapola la caída de los primeros 10 dB. Si la curva de decaimiento es lineal los valores de T20, T30, EDT tienden a coincidir.

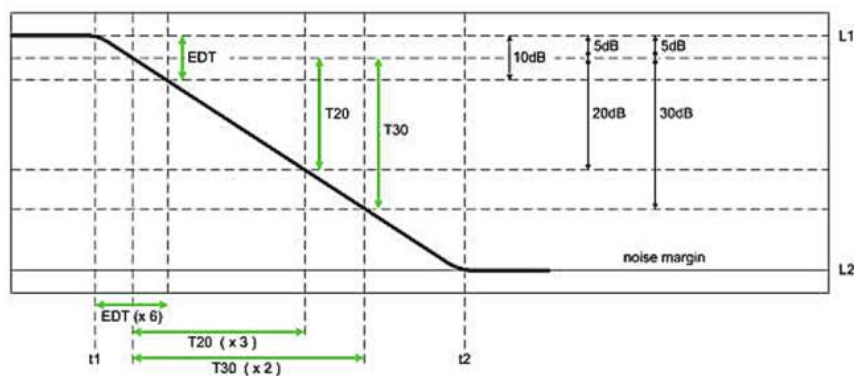


Figura 1 : Comparación entre T20, T30, y EDT.

Para recintos con baja absorción, Sabine [2] establece que el tiempo de reverberación se puede estimar a partir del volumen del recinto (V) y el área de absorción equivalente (A) mediante la ecuación (1) asumiendo velocidad del sonido de 343 m/s:

$$RT = 0,161 \frac{V}{A} \quad (1)$$

Siendo A determinado por el producto entre el coeficiente de absorción promedio $\bar{\alpha}$ y la superficie total asociada S_T :

$$A = \bar{\alpha} * S_T \quad (2)$$

2.2. Coeficiente de absorción

El coeficiente de absorción (α) cuantifica la porción de energía acústica que es absorbida por un material tras incidir una onda acústica sobre él. Toma valores entre 0 y 1,

siendo 1 un absorbente perfecto (toda la energía es absorbida) y 0 una superficie completamente reflejante.

La norma ISO 354 establece un método para obtener el coeficiente de absorción a partir del tiempo de reverberación en la cámara reverberante con y sin la muestra. Despejando el área de absorción de la ecuación de Sabine para cada caso se obtiene:

$$A_1 = 0,161 * \left(\frac{V}{RT_1}\right) - 4m_1V \quad (3)$$

$$A_2 = 0,161 * \left(\frac{V}{RT_2}\right) - 4m_2V \quad (4)$$

Siendo A_2 y A_1 las áreas de absorción con y sin muestra respectivamente.

Los coeficientes m_1 y m_2 corresponden a la absorción del aire, los cuales se pueden simplificar si las mediciones se realizan en las mismas condiciones y recinto.

Se establece el área de absorción equivalente A_T como la diferencia entre las áreas de absorción con y sin la muestra:

$$A_T = A_2 - A_1 = A_T = 0,161 * V * \left(\frac{1}{RT_2} - \frac{1}{RT_1}\right) \quad (5)$$

Por lo tanto obteniendo el A_T se despeja α de la ecuación (2):

$$\alpha = \frac{A_T}{S_T} \quad (6)$$

Para determinar la desviación estándar relativa utilizando el T20 y el valor de incertidumbre del coeficiente de absorción, se utilizan las ecuaciones (7) (8) y (9) del [Anexo 1](#).

2.3. Frecuencia de Schroeder

La frecuencia de Schroeder define el límite inferior a partir del cual la densidad modal en bajas frecuencias genera picos y valles de presión que se traducen en variaciones de nivel de presión sonora. Ésta se determina a partir del RT y el volumen de la sala V :

$$f_{Sch} = 2000\sqrt{\frac{RT}{V}} \quad (7)$$

2.4. ISO 354

Para medir el coeficiente de absorción de un material la Norma ISO 354 establece contar con al menos 12 mediciones del tiempo de reverberación con y sin la muestra, al menos 3 posiciones de micrófono y 2 posiciones de fuente. Los micrófonos deberán ser omnidireccionales y situarse a una distancia mínima de 1,5 m entre ellos, 1 m de cualquier superficie reflejante, y 2 m de cualquier fuente sonora. Las fuentes deberán ser omnidireccionales y sus posiciones deben distar al menos en 3 m entre sí.

La superficie de la muestra de ensayo deberá ser de entre 10 y 12 m^2 a fin de minimizar el efecto de borde. Se entiende por efecto de borde a la incidencia de energía sonora sobre un borde de una superficie, donde una parte absorbe, otra se difracta, y otra se refleja. Qué tan significativo será éste dependerá de la longitud de la onda incidente y de la composición de la muestra.

2.5. Cámara Reverberante

La norma establece los requisitos que debe cumplir un recinto que funcione como cámara reverberante:

- Un volumen de mínimo 150 m^3 , siendo un valor recomendado de 200 m^3 , y que no supere los 500 m^3 , dado que en recintos tan grandes entra en juego la absorción del aire en altas frecuencias.
- Que el recinto sea un paralelepípedo cuya mayor dimensión siga la siguiente relación con el volumen:

$$l_{max} = \sqrt[3]{1,9V} \quad (8)$$

3. Procedimiento

3.1. Equipamiento utilizado

Para llevar a cabo el procedimiento se utilizan seis micrófonos omnidireccionales Earthworks M50, un sonómetro Svantek SVAN 959, una interfaz de audio RME Fireface UFX+, una notebook con el software Reaper y una fuente omnidireccional Outline modelo Globe Source Radiator. La muestra utilizada consiste de 3 disposiciones diferentes de un conjunto de paneles absorbentes, compuesto por 4 paneles largos de 0,42 x 1,45 m y 2 paneles chicos de 0,45 x 1,15 m. Esto resulta en un área total de absorbente de 3,47 m². Vale aclarar que los bordes expuestos de los paneles tienen una altura de 0,1 m.

3.2. Recinto

La medición se realizó el viernes 6 de junio, entre las 10:00 y las 13:00 hs, en el aula 301 de la sede Caseros II de la Universidad Nacional de Tres de Febrero. Durante la jornada se registra una temperatura exterior de 10 °C y una humedad relativa del 47 % según la información del pronóstico del día de AccuWeather [3]. Sin embargo, se entiende que dentro del recinto las condiciones eran de una temperatura y humedad mayores, pero dado que se considera que no hubo variaciones significativas de estas variables, se desprecian los términos que las incluyen en el cálculo de absorción. Las dimensiones del recinto utilizado, simplificándolo en un paralelepípedo (sin irregularidades), son 8,9 m de largo, 4,9 m de ancho y 2,6 m de alto.

Como primer paso, se mide el ruido de fondo del aula utilizando el sonómetro, con el fin de asegurar que las señales a utilizar en la medición se encuentren por encima del piso de ruido, en al menos 40 dB. Luego, se realiza un modelado de la sala en SketchUp, como se muestra en la Figura 1, con el objetivo de planificar la disposición de la fuente y de los micrófonos de acuerdo con los lineamientos de la norma ISO 354.



Figura 1: Modelado en 3D del aula donde se realiza la medición.

3.3. Mediciones

Se establecen las posiciones de micrófonos y fuente respetando la norma ISO 354. Se define una configuración con seis micrófonos distribuidos en el espacio, procurando que estén ubicados a más de un metro de superficies reflejantes y a no menos de dos metros de la fuente sonora. A su vez, se establecen dos posiciones diferentes para la fuente, cada una ubicada a más de 3 m entre sí. Esta disposición se muestra en la Figura 2.



Figura 2: Posiciones de micrófonos y fuente.

Antes de iniciar las mediciones, se reproduce un barrido senoidal logarítmico de 5 segundos para verificar que el micrófono más cercano a la fuente no presente saturación y que el más alejado registre una relación señal/ruido mayor a 30 dB. Además, se mide el TR_{mid} del recinto para calcular la frecuencia de Schroeder mediante (7). Luego, se calculó el TR en dicha frecuencia, a fin de obtener una estimación más precisa de la F_{sch} del recinto.

Verificadas estas condiciones, se realizan las mediciones principales siguiendo la normativa. Se ubica la fuente en una primera posición y, para cada configuración de muestra, se reproducen 2 barridos senoidales logarítmicos de 60 segundos registrando la señal en simultáneo con los 6 micrófonos. Este procedimiento se repitió para 3 configuraciones de muestra y 2 posiciones de fuente, manteniendo fija la ubicación de los micrófonos. En la Figura 3 se muestran las tres disposiciones de la muestra. Se buscó por un lado variar la homogeneidad de la distribución y cantidad de bordes expuestos, y por otro lado invertir las caras dejando la expuesta la parte trasera de los paneles.



Figura 3: Disposiciones de la muestra 1 a 3 de izquierda a derecha.

Por último, se repite el proceso con la sala vacía (sin la muestra) respetando las mismas posiciones de fuente y micrófonos. Esto permite hacer una comparación para calcular el efecto del material absorbente, tal como indica la norma ISO 354.

Cabe aclarar que el procedimiento no cumple con todos los requisitos establecidos por la norma, principalmente debido a limitaciones del recinto, el cual no posee el volumen ni la relación de dimensiones requeridas, y tampoco se asegura un comportamiento acústico isotrópico debido a la ausencia de difusores, lo que compromete la reproducibilidad de los resultados. Además, la superficie total de muestra de 3,47 m² no se encuentra en el rango de los 10 a 12 m² especificados por la norma y tampoco cumple la relación entre el ancho y largo del panel de 0,7 a 1. Por otra parte, debido al reducido espacio se utilizaron 6 micrófonos simultáneos en vez de los 12 que sugiere la norma.

3.4. Procesamiento

Para obtener las respuestas al impulso se convolucionan cada medición con el filtro inverso asociado al LSS. Estas respuestas se analizan utilizando el plugin Aurora en Audacity y un script en Python [Anexo 2](#), a fin de determinar el tiempo de reverberación promedio por bandas de tercio de octava tanto en la sala vacía como en cada una de las configuraciones con muestra. Al usar 6 posiciones de micrófonos, 2 de fuentes y 2 sweeps por toma, se generan un total de 24 RIRs para cada condición de medición (sala vacía, muestra 1, muestra 2 y muestra 3). Finalmente, se promedian estos resultados, y se calcula mediante Ecuación (6) el coeficiente de absorción acústica de la muestra según las bandas de frecuencia consideradas anteriormente. Para el cálculo se utiliza una superficie de $3,47 \text{ m}^2$ y un volumen de 110 m^3 , calculado en base a las mediciones *in situ* de las dimensiones del recinto.

4. Resultados y Análisis

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de realizar el procesamiento de las respuestas al impulso adquiridas. En la Figura 4, se presenta la comparación de los tiempos de reverberación estimados mediante T20 para cada condición de medición.

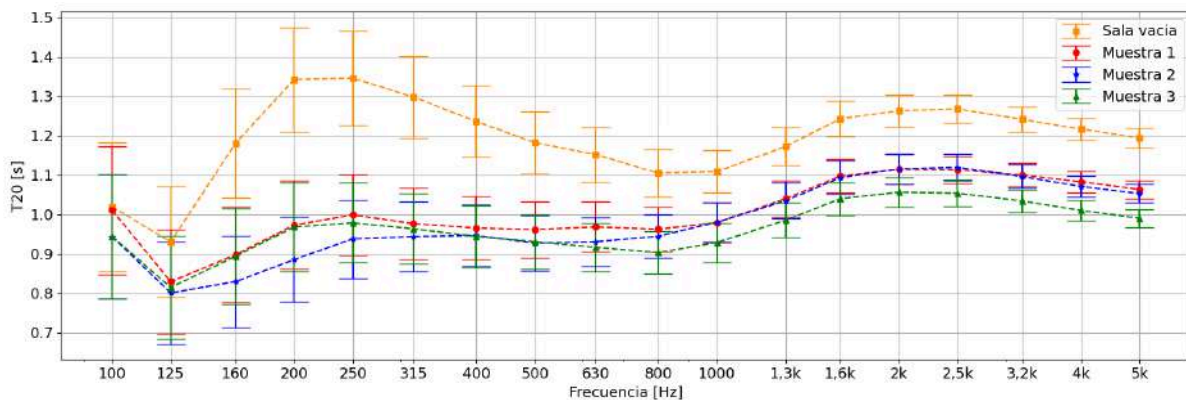


Figura 4: Comparación de TR20 según condiciones de muestra.

En general, se observa una baja significativa del tiempo de reverberación para el rango de 160 a 630 Hz, respecto del de 800 Hz a 5 kHz, al colocar cualquiera de las tres muestras estudiadas. Este fenómeno llevaría a pensar que se tiene un coeficiente de absorción de las muestras más alto en el rango de bajas frecuencias que en el de medias y altas. Sin embargo, este resultado no se da por una característica del material específico sino por el efecto de borde de los paneles de muestra utilizados, que genera una sobreestimación del α de la muestra, debido a la difracción en ese sector por la longitud de onda de las frecuencias en el rango mencionado. De hecho, para la muestra 2, se tienen más bordes de cada panel al descubierto por el tipo de disposición utilizado, lo que implica un mayor efecto de difracción para bajas frecuencias, que se ve reflejado en un tiempo de reverberación levemente menor en las bandas de frecuencia de 160 a 250 Hz. Este análisis se corresponde con la respuesta de absorción presentada en Figura 5, donde la muestra 2 presenta valores de absorción que no son representativos en este mismo rango de frecuencias. Este resultado se justifica a partir del tamaño de la muestra, el cual posee una superficie menor a la que indica la norma.

Por otro lado, en todo el rango de 800 Hz a 5 kHz, puede verse la disminución del tiempo de reverberación de manera uniforme, para los 3 casos. Coherentemente, la muestra 3 presenta un menor T20 debido a que la superficie expuesta es diferente a la de las otras dos.

En la Figura 5, se presentan los coeficientes de absorción obtenidos.

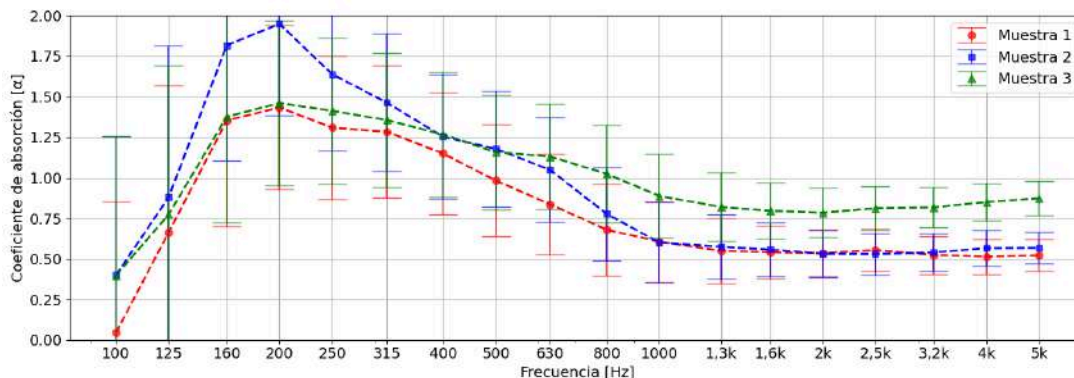


Figura 5: Comparación de coeficientes de absorción para cada disposición de muestra.

Se puede ver que se tiene una incertidumbre relativamente alta en el rango de 100 Hz a 315 Hz, atribuible a la influencia de los modos de resonancia de la sala en los registros de las diferentes posiciones de micrófonos, pudiendo haber grandes diferencias por estar ubicados en nodos de máxima o mínima presión. Utilizando el TR_{mid} se obtuvo una $F_{sch} = 200 \text{ Hz}$ (7), tras iterar utilizando el TR a dicha frecuencia se obtuvo $F_{sch} = 220 \text{ Hz}$.

La muestra 2 presenta mayores valores de α , atribuibles al efecto de borde mencionado anteriormente, ya que esta presenta mayor cantidad de bordes expuestos. El efecto tan marcado se puede deber a las dimensiones de los bordes expuestos, ya que los paneles tienen 10 cm de profundidad.

La muestra 3 presenta más absorción en medias y altas frecuencias (de 630 Hz a 5 kHz), evidenciando que el material absorbente al descubierto de la parte trasera es más efectivo en ese rango. Las muestras 1 y 2 presentan el mismo comportamiento para frecuencias superiores a 1 kHz, lo que se justifica a partir de que se trata en ambos casos de la misma cara expuesta (cubierta de tela), aunque con una diferente distribución en el espacio. Esto indica que a partir de 1 kHz, es seguro que ni el efecto de borde, ni los modos afectan a la respuesta, y por eso se observan valores de coeficiente de absorción similares.

En la Figura 6 se muestra una comparación de los T20 promedio entre las bandas de frecuencia de 20 a 315 Hz y de 315 Hz a 20 kHz, para diferentes posiciones de micrófonos y fuente (solo muestra 1).

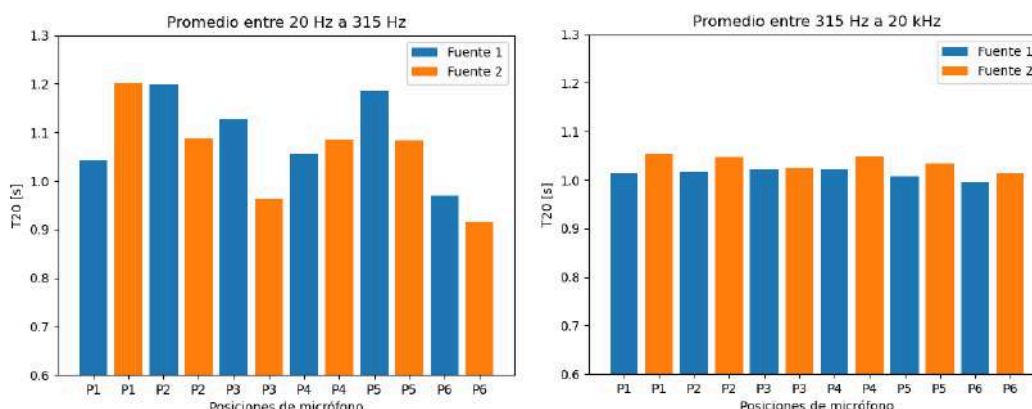


Figura 6: Comparación de T20 promedio. Izq.: de 20 a 315 Hz. / Der.: de 315 Hz a 20 kHz.

Puede verse cómo el comportamiento modal de la sala afecta considerablemente los resultados entre diferentes posiciones, impactando la precisión del cálculo de absorción. Se consideran válidos los resultados para el rango de frecuencias libre de comportamiento modal (por encima de la F_{sch}) donde se tiene uniformidad en los resultados de las mediciones tanto para diferentes posiciones de micrófonos como de fuentes.

5. Conclusiones

La experiencia detallada en este informe permitió estimar el coeficiente de absorción acústica de un conjunto de paneles fonoabsorbentes siguiendo los lineamientos de la norma ISO 354. Cabe aclarar que no se cumplieron en su totalidad los requisitos establecidos por la norma, encontrándose las mayores limitaciones en el recinto utilizado para la medición, el cuál no se corresponde con una cámara reverberante, y en el tamaño de la muestra, que era menor de lo requerido.

El análisis considerando diferentes posiciones de micrófonos y fuentes permitió evidenciar una marcada influencia del comportamiento modal de la sala por debajo de la frecuencia de Schroeder (~220 Hz), lo que genera una alta variabilidad entre mediciones. Sumado al problema modal, también se tiene el efecto de borde, que debido a la superficie y grosor de la muestra, se vuelve un factor determinante y afecta la precisión de la medición de la absorción real en frecuencias bajas.

Si bien los resultados muestran un coeficiente de absorción más elevado en el rango de frecuencias entre 160 y 630 Hz, lo que sugeriría que la muestra sería de utilidad en recintos que requieran tratamiento acústico en dichas bandas, debe considerarse que estos resultados están sobredimensionados debido al efecto de borde y las limitaciones mencionadas anteriormente. De esta manera, en cuanto a la incertidumbre propia de la medición, los resultados más confiables se encuentran por encima de 1 kHz, donde las muestras bajo ensayo presentan coeficientes de absorción de entre 0,5 y 0,6 para la superficie cubierta con tela, y entre 0,75 y 0,85 para la superficie descubierta. En base a estos resultados, se deduce que la tela cobertora disminuye la absorción del material que cubre, y que la disposición de las muestras (1 y 2) no varían la absorción significativamente en el rango mencionado, al menos para el contexto particular estudiado.

En síntesis, si bien los resultados obtenidos permiten caracterizar de manera preliminar la absorción acústica de los paneles medidos, se sugiere repetir las mediciones en una cámara reverberante con un volumen de al menos 150 m³ y una muestra de entre 10 y 12 m², como establece la norma. Esto permitiría reducir la incertidumbre de la medición y obtener coeficientes de absorción más representativos de la muestra utilizada.

Por último, se señala una limitación inherente a la norma ISO 354; la ausencia de especificaciones respecto a la disposición espacial de la muestra durante la medición. En este trabajo se ensayaron tres configuraciones distintas, definidas de manera arbitraria, lo que podría haber influido en los resultados obtenidos. Sería deseable que futuras revisiones de la norma contemplen criterios sobre la disposición de las muestras, con el fin de mejorar la reproducibilidad y la comparabilidad entre estudios.

6. Referencias

[1] AENOR. (2003). *UNE-EN ISO 354:2003. Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.*

[2] W. C. Sabine, *Collected Papers on Acoustics*, Harvard University Press (1922); republished, Acoustical Society of America (1993).

[3] AccuWeather. (s. f.). *Pronóstico diario del clima para Buenos Aires* [Página web]. Recuperado el 22 de junio de 2025, de <https://www.accuweather.com/es/ar/buenos-aires/7894/daily-weather-forecast/7894>

7. Anexo

I. Cálculos y ecuaciones auxiliares

Para determinar la desviación estándar relativa utilizando el T20 la norma establece el cálculo de incertidumbre según Ecuación (9). Donde T es el tiempo de reverberación por frecuencias, f es la frecuencia y N es la cantidad de mediciones realizadas para determinar este tiempo de reverberación.

$$\epsilon_{20}(T) = T * \sqrt{\frac{2,42+3,59/N}{f*T}} \quad (9)$$

Para determinar el valor de incertidumbre del coeficiente de absorción, se realiza la incertidumbre expandida, donde se asume que la distribución de ambas mediciones de T20 presenta una distribución normal, y en consecuencia se puede expresar el desvío combinado según Ecuación 10, donde σ_{T_1} y σ_{T_2} es el desvío estándar de cada medición respecto a la media. Este aproximación desestima la propagación del error en el cálculo del volumen del recinto.

$$\sigma_A^2 = \left(\frac{\partial A}{\partial T_1}\right)^2 \sigma_{T_1}^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial T_2}\right)^2 \sigma_{T_2}^2 \quad (10)$$

La derivada parcial se realiza respecto a la Ecuación 5, y se obtiene la expresión de la incertidumbre del coeficiente de absorción σ_A según Ecuación 11.

$$\sigma_A = \sqrt{\left(\frac{0,161 \cdot V}{T_1^2}\right)^2 \sigma_{T_1}^2 + \left(\frac{0,161 \cdot V}{T_2^2}\right)^2 \sigma_{T_2}^2} \quad (11)$$

II. Cálculo del coeficiente de absorción en Python

Se calcula el valor de T20 promedio para todas las muestras a partir de los resultados de Aurora:

```
# TR20 en vacio
result_vacio = parse_aurora('sala_vacia.txt')
stats_vacio = compute_stats(result_vacio)
parameter = "T20"
t20_vacio_mean = stats_vacio[parameter]["mean"][6:-6] # Se indexa para
promediar de 100 a 5k Hz
t20_vacio_std = desvio_rt(t20_vacio_mean, freq)

# TR20 con muestra1
result_m1 = parse_aurora('muestra1.txt')
stats_m1 = compute_stats(result_m1)
parameter = "T20"
t20_m1_mean = stats_m1[parameter]["mean"][6:-6]
t20_m1_std = desvio_rt(t20_m1_mean, freq)
```

Se calcula el coeficiente de absorción:

```
# Calculo de absorción
V = 110 # Volumen (m3)
S = 3.47 # Superficie muestra (m2)
c = 343 # Velocidad del sonido (m/s)

# Muestra1
Att1 = 55.3 * V * ( (1/(c * np.array(t20_m1_mean))) - (1/(c *
np.array(t20_vacio_mean))) )
alpha1 = Att1/S
alpha1_desv = desvio_alpha(t20_vacio_mean, t20_m1_mean, t20_vacio_std,
t20_m1_std, c, V)
```

Funciones para el cálculo del desvío:

```
def desvio_rt(Rt_mean, freqs):
    N = 24 # Cantidad de mediciones
    return Rt_mean * np.sqrt((2.42 + (3.59/N))/(np.array(freqs) *
Rt_mean))

def desvio_alpha(T_vacio, T_muestra, desv_vacio, desv_muestra, c, V):
    N = 24 # Cantidad de mediciones
    desv_muestra = desv_muestra/(np.sqrt(N)) # Desvío respecto a la
media
    desv_vacio = desv_vacio/(np.sqrt(N)) # Desvío respecto a la media

    first_term = ((55.3 * V)/(c * np.array(T_vacio)**2))**2
    second_term = ((55.3 * V)/(c * np.array(T_muestra)**2))**2
    sum_terms = (first_term * desv_vacio**2) + (second_term *
desv_muestra**2)
    return np.sqrt(sum_terms)
```

Se repite este procedimiento para el cálculo de la muestra 2 y la muestra 3.

- **4. Pregunta desarrollada:**

¿Cómo se podría medir el coeficiente de absorción de una muestra sin una cara plana definida que se apoye sobre el suelo? Ya sea mobiliario, objetos o paneles con geometrías complejas ¿Qué impacto tiene su disposición espacial dentro del recinto en los resultados obtenidos siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ISO 354?