

GOOD VIBRATIONS

Del sonido al espacio: aplicación de las Figuras de Chladni en el diseño paramétrico.

Autor: María Borges Martín

Director del proyecto: Rubén Servando Carrillo

Universidad Europea de Canarias

Titulación: Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Trabajo Fin de Grado (Curso 2024-2025)

RESUMEN

Diseñar desde el sonido y para el sonido ha sido el motor de esta investigación, que toma como base las Figuras de Chladni para explorar nuevas formas que respondan a patrones sonoros, creando prototipos formales de placas para tratamiento acústico. El proyecto propone una aproximación al diseño entendiendo la onda sonora estacionaria no solo como objeto de estudio, sino como generador geométrico.

La investigación combina técnicas de modelado paramétrico (Geometry Nodes) y fabricación aditiva. El proyecto se estructura en una fase de investigación teórica, experimentación digital, y validación formal, con el fin de convertir visualizaciones de ondas en piezas imprimibles. Se crean una serie de prototipos escalables y adaptables. Se ha estudiado el uso de materiales sostenibles alternativos compatibles con la impresión 3D que permitan la fabricación real de los modelos.

Los resultados evidencian que los fenómenos naturales pueden convertirse en fundamentos de diseño, dónde la forma no es arbitraria sino consecuencia directa de una lógica física. Además, se reconoce la necesidad de futuras evaluaciones acústicas en laboratorio para estudiar el comportamiento de las placas.

Palabras clave: arquitectura, acústica, Figuras de Chladni, ondas sonoras, diseño paramétrico, fabricación aditiva.

ABSTRACT

Designing from sound and for sound has been the driving force behind this research, which is based on Chladni's Figures to explore new forms that respond to sound patterns, creating formal prototypes of panels for acoustic treatment. The project proposes an approach to design that understands the stationary sound wave not only as an object of study, but also as a geometric generator.

The research combines parametric modelling techniques (Geometry Nodes) and additive manufacturing. The project is structured in a phase of theoretical research, digital experimentation, and formal validation, in order to convert wave visualisations into printable models. A series of scalable and adaptable prototypes are created. The use of alternative sustainable materials compatible with 3D printing has been studied to enable the actual manufacture of the models.

The results show that natural phenomena can be converted into design fundamentals, where form is not arbitrary but a direct consequence of physical logic. Furthermore, the need for future acoustic evaluations in the laboratory to study the behaviour of the panels is recognised.

Keywords: architecture, acoustics, Chladni Figures, sound waves, parametric design, additive manufacturing.

I hear the sound of a gentle word
On the wind that lifts her perfume through the air
I'm pickin' up good vibrations

Good Vibrations, The Beach Boys, 1966

Don't you wonder sometimes
About sound and vision?

Sound and Vision, Low, David Bowie, 1977

AGRADECIMIENTOS

Este Trabajo Fin de Grado ha sido posible gracias al apoyo y respaldo de las siguientes personas.

A Rubén Servando Carrillo, tutor de este trabajo y pilar fundamental en mi formación, por su confianza, acompañamiento, y por abrirme la puerta para poder desarrollar esta línea de investigación desde una perspectiva crítica y creativa.

Al profesorado que me ha acompañado a lo largo de estos años, por ofrecerme una enseñanza de calidad y fomentar mi interés dentro de las distintas ramas de esta disciplina.

A Estela, compañera, amiga y la mejor persona con la que podía haber compartido mesa el primer día de universidad y todos los que vinieron después.

Dar las gracias a mis seres queridos que han estado a mi lado durante todo el proceso y han celebrado mis logros como si fueran suyos.

TABLA RESUMEN

Nombre y apellidos	María Borges Martín
Título del proyecto	GOOD VIBRATIONS Del sonido al espacio: aplicación de las Figuras de Chladni en el diseño paramétrico
Directores del proyecto	Rubén Servando Carrillo
El proyecto se ha realizado en colaboración de una empresa o a petición de una empresa	NO
El proyecto ha implementado un producto	NO
El proyecto ha consistido en el desarrollo de una investigación o innovación:	SI
Objetivo general del proyecto	Exploración del sonido como generador formal mediante la traducción de las Figuras de Chladni en diseño paramétrico

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	9
1.1 INTRODUCCIÓN.	9
1.2 MOTIVACIÓN.	9
1.3 MARCO TEÓRICO.	10
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	26
2.1 OBJETIVO GENERAL.	26
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	26
2.3 LIMITACIONES DEL PROYECTO.	27
2.4 BENEFICIOS DEL PROYECTO.	27
2.5 METODOLOGÍA.	28
2.6 RECURSOS REQUERIDOS.	29
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO.	31
3.1 INTRODUCCIÓN.	31
3.2 DISEÑO PARAMÉTRICO.	34
3.3 EXPLORACIÓN DE LAS FORMAS: PROTOTIPOS.	48
3.4 IMPRESIÓN 3D Y MATERIALIDAD.	49
3.5 CONSIDERACIÓN DE LA PROPUESTA.	54
CAPÍTULO 4. CONCLUSIÓN.	56
CAPÍTULO 5. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN.	58
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.	60
REFERENCIA DE FIGURAS.	61

- LE SACRE DU PRINTEMPS - musique de Stravinsky
 Danse sacrée de l'élue - chorégraphie de Nijinsky

The manuscript page features several line drawings of dancers in dynamic, expressive poses, characteristic of Nijinsky's choreography. These sketches are interspersed with musical notation. The notation includes staves with notes, rests, and dynamic markings such as *sempre sf*, *f pesante*, *ff remma*, *ff*, and *sf*. There are also markings for *8^{va} Basso* and *8^{va} Basso*. The sketches show dancers in various poses, some with long, flowing hair and dresses, and others in more compact, crouched positions. The musical notation is written in a style typical of early 20th-century manuscripts, with some staves showing complex rhythmic patterns and others showing more melodic lines.

quelques uns des
 mouvements notés en 1913

Valentine Hugo

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

1.1 INTRODUCCIÓN.

El ser humano vive rodeado de sonido desde tiempos ancestrales, siendo en la prehistoria dónde se encuentra origen de la música. Y es que, más allá de su dimensión artística y cultural, la música es, en esencia, una manifestación ordenada de sonido: una vibración que se propaga en el espacio que deja una huella en quién la escucha y en los espacios que la contienen.

Sin embargo, no todos los sonidos que nos rodean componen una melodía. Algunos generan confort, otros provocan alerta, pero la mayoría moldean la forma en la que habitamos el espacio, aunque no lo percibamos conscientemente.

A lo largo de la historia, el vínculo entre arquitectura y acústica ha estado presente, especialmente en espacios destinados a la apreciación de la música o a la necesidad de silencio. Pero, en un mundo cada vez más saturado de estímulos, la consideración por espacios sensibles al sonido y al bienestar acústico está cobrando mayor relevancia.

En este contexto, el presente trabajo propone una línea de investigación en la que el sonido, un fenómeno invisible pero omnipresente, se convierte en generador de forma, ofreciendo nuevas posibilidades para el diseño y el tratamiento acústico.

¿Es posible diseñar para el sonido desde el propio sonido? ¿Puede la onda sonora ser materializada y construida?.

1.2 MOTIVACIÓN.

La motivación principal de este proyecto nace de una inquietud por explorar cómo los fenómenos del mundo físico pueden informar y enriquecer el proceso de diseño arquitectónico. En una época en la que la sostenibilidad, la experiencia sensorial y la personalización del espacio adquieren protagonismo, repensar la relación entre sonido, forma y materia presenta una oportunidad para innovar en el diseño de entornos más conscientes y adaptados a sus usuarios.

Entre esos fenómenos, el sonido - y su expresión en la música - cautiva por su capacidad de transmitir emociones y crear atmósferas. La elección de las Figuras de Chladni como punto de partida responde a su capacidad para visualizar ondas sonoras estacionarias en el espacio, convirtiendo un fenómeno intangible en una geometría legible y reproducible, vinculando sonido y forma y abriendo las puertas a nuevas formas de diseño y de acondicionamiento acústico.

Además, el uso de tecnologías de impresión 3D, junto con materiales potencialmente sostenibles o biodegradables, representa una vía realista y emergente para fabricar sistemas ligeros y adaptables, reduciendo su impacto al mismo tiempo que se exploran las nuevas líneas de fabricación.

1.3 MARCO TEÓRICO.

-“Si un árbol cayera en una isla sin seres humanos, ¿se oiría algún sonido?”

-“No. El sonido es la sensación que se produce en el oído cuando el aire u otro medio se pone en movimiento”.

Esta pregunta se planteó por primera vez en la revista The Chautauquan Daily en junio de 1883.

La respuesta se obtiene considerando la ciencia del sonido: la acústica. Según Reiner Guski, el sonido de un árbol al caer en una isla o en un bosque, junto con todos los demás sonidos del mundo, son simplemente vibraciones en el aire causadas inicialmente por el movimiento físico. Estas vibraciones, conocidas como ondas sonoras, se propagan a través del aire y de medios sólidos, hasta alcanzar los oídos, dónde hacen vibrar el tímpano, enviando señales eléctricas que el cerebro decodifica como sonido (Van Kamp & Woudenberg, 2024).

Aunque una explicación tan precisa pueda parecer que despoja de su misterio a la pregunta, también permite apreciar la belleza de lo invisible: todo lo que se escucha, desde el canto de los pájaros hasta las cuerdas de una orquesta, nace de simples vibraciones que viajan por el espacio, cada una con un patrón único (Van Kamp & Woudenberg, 2024).

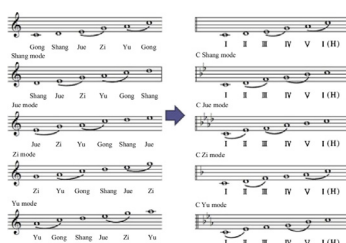
1.3.1 Cronología de la acústica.

Este apartado recorre de forma sintética los hitos más relevantes en la evolución del conocimiento acústico.



Hace 2,5 millones de años hasta 1200 a. C.:
Los cazadores, al transmitir sus conocimientos sobre tácticas de caza a las nuevas generaciones, descubrieron que organizarse en círculo era la forma más eficaz para que todos pudieran escuchar con claridad el mensaje (BAUX, 2021).

Figura 1. iStock (2022). La vida de los habitantes de las cuevas [Ilustración]. En iStock.



2600 a.C.:
En China se registra por primera vez la escala pentatónica (International Commission for Acoustics, 2017).

Figura 2. Chieng, W. (2015). The traditional Chinese pentatonic modes definition [Partitura]. En ResearchGate.



500 a.C.:
El filósofo griego Pitágoras estudia las propiedades de las cuerdas vibrantes y descubre que ciertos intervalos generan sonidos agradables al oído (International Commission for Acoustics, 2017).

Figura 3. Sanzio, R. (1512b). Pitágoras - Escuela de Atenas [Fresco]. En WikiCommons.



400 a.C.:
Se construye el Teatro de Epidauro en Grecia, diseñado con conocimientos acústicos. Su geometría actúa como un filtro natural que puede transportar instrumentos y voces con claridad hasta la última fila. A día de hoy se considera cómo referente (BAUX, 2021).

Figura 4. ASI Architectural. (2022). The Theater at Epidauros – An Ancient Marvel of Acoustic Design [Fotografía]. En ASI Architectural.



350 a.C:

Aristóteles sugiere de forma correcta que una onda sonora se propaga en el aire a través del movimiento del aire (International Commission for Acoustics, 2017).

Figura 5. Sanzio, R. (1512a). Aristoteles - Escuela de Atenas [Fresco]. En WikiCommons.



20 a.C:

El arquitecto romano Vitruvio en su obra "De Architectura" describe fenómenos como ecos, interferencias y reverberaciones, en el tratado sobre las propiedades acústicas de los teatros (Rossing, 2014).

"Debemos elegir un sitio donde la voz pueda caer suavemente y no ser devuelta por reflexión, de modo que transmita un significado indistinto al oído"

Figura 6. Vitruvio. (n.d.). De Architectura [Ilustración]. En ArquInsights..



953-1048 a.C:

En la Edad de Oro islámica, el científico Abū Rayhān al-Bīrūnī plantea que la velocidad del sonido es considerablemente inferior a la de la luz (BAUX, 2021).

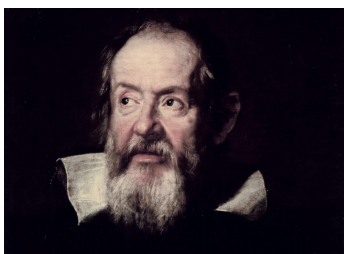
Figura 7. Fernández, T., & Tamaro, E. (n.d.). Al-Biruni [Ilustración]. En Biografías y Vidas.



1635 d.C:

Pierre Gasendi, científico y filósofo francés, realiza el primer intento documentado de medir la velocidad del sonido en el aire (International Commission for Acoustics, 2017).

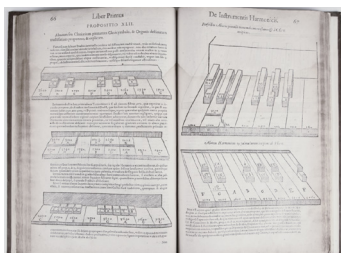
Figura 8. de Gheyn, J. (2012). Pierre Gasendi Experimento [Ilustración]. En Indiana Public Media.



1564-1642 a.C:

Galileo Galilei y Marin Mersenne, trabajando de forma independiente, descubren las leyes completas de la vibración de las cuerdas. Galileo escribe: "las ondas se producen por las vibraciones de un cuerpo sonoro, que se propagan por el aire, llevando al tímpano del oído un estímulo que la mente interpreta como sonido" (BAUX, 2021).

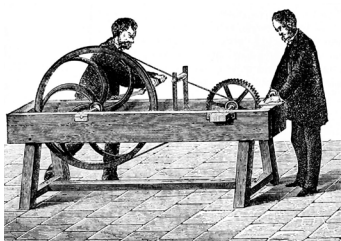
Figura 9. Sustermans, J. (1637). Galileo [Óleo]. En Britannica: Uffizi Gallery.



1636 d.C:

Marin Mersenne culmina sus estudios sobre la vibración de cuerdas tensadas formulando tres leyes que llevan su nombre. Su obra Harmonicorum Libri sienta las bases de la acústica musical moderna (International Commission for Acoustics, 2017).

Figura 10. Baudry, G. (1635). Marin Mersenne : Harmonicorum Libri In Quibus Agitur De Sonorum Natura, Causis & effectibus [Fotografía]. En J & J Lubrano Music Antiquarians.



1681 d.C:

El físico inglés Robert Hooke logra generar por primera vez una onda sonora de frecuencia conocida, utilizando una rueda dentada en rotación como dispositivo de medición (International Commission for Acoustics, 2017).

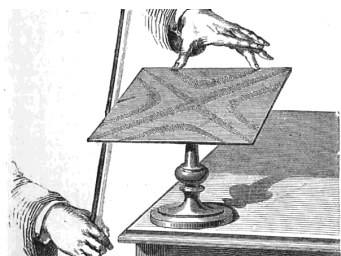
Figura 11. Pressbooks. (1873). Robert Hooke: Savart Wheel diagram [Ilustración]. En Popular Science Monthly Volume 3, p.8.



1696 d.C:

Joseph Sauveur, matemático y físico francés acuña el término acoustique (acústica) definiéndolo como "la ciencia del sonido" (International Commission for Acoustics, 2017).

Figura 12. Joseph Sauver (1716). Ilustración. En WikiCommons



1787-1802 d.C:

Ernst Chladni desarrolla una técnica para visualizar los patrones de ondas estacionarias en placas vibrantes esparciendo arena sobre su superficie. Años más tarde publica su libro Die Akustik, considerado fundamental en el desarrollo de la acústica experimental (International Commission for Acoustics, 2017).

Figura 13. Nales, R. (1787). Chladni Experiment [Ilustración]. En IDIS.



1877 d.C:

El inventor estadounidense Thomas Alva Edison presenta el fonógrafo, el primer dispositivo capaz de grabar y reproducir sonido. Ese mismo año, el físico inglés John William Strutt, conocido como Lord Rayleigh, tras realizar una extensa investigación, publica su tratado The Theory of Sound dos volúmenes. Esta obra marca el inicio de la acústica moderna como disciplina científica (BAUX, 2021).

Figura 14. Handy, L. C. (2017). Edison con su primer fonógrafo [Fotografía]. En Cienciaplus.



1892 d.C:

Se desarrolla uno de los primeros materiales acústicos, la Cabot's Quilt, fabricado con zosteria marina envuelta en papel Kraft (BAUX, 2021).

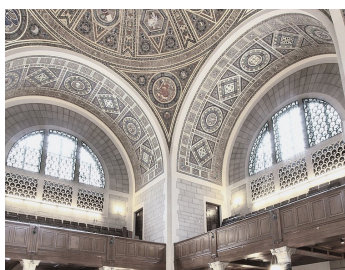
Figura 15. Samuel Cabot Inc. (1928). Cabot's quilt [Fotografía]. En Internet Archive.



1898 d.C:

Wallace Clement Sabine, considerado el padre de la acústica arquitectónica, define el concepto de tiempo de reverberación y formula una ecuación para calcularlo en una sala. Esta relación se conoce actualmente como la fórmula de Sabine (International Commission for Acoustics, 2017).

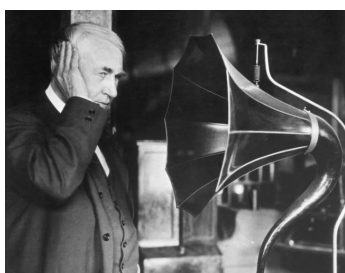
Figura 16. Viriditas. (2006). Boston Symphony Hall with interior acoustically designed by Wallace Clement Sabine [Fotografía]. En WikiCommons.



1911 d.C:

Wallace Clement Sabine continúa su investigación y desarrolla su Rumford Tile, fabricada con una mezcla de arcilla, turba y feldespato, que al hornear genera una pieza porosa (BAUX, 2021).

Figura 17. Acoustic Tile in the interior of National Academy of Sciences Washington, DC. (1924). [Fotografía]. En International Hildreth Meière Association.



Década de 1920 d.C:

La investigación y producción de materiales acústicos se acelera. Los nuevos materiales introducidos para el tratamiento acústico son la madera, lana mineral, corcho, yeso, bagazo de caña de azúcar, cemento y amianto (BAUX, 2021).

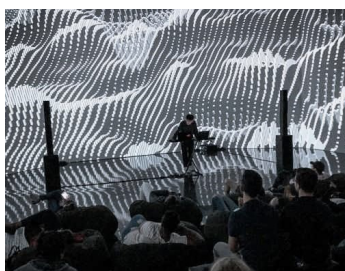
Figura 18. Bettmann. (1920). Thomas Edison listening to a phonograph [Fotografía]. En Britannica.



Actualidad:

Compañías como Arturel realizan obras de arte acústicas a base de materiales reciclados.

Figura 20. Arturel. (2025). Sample box of acoustic panels [Fotografía]. En Arturel.



Futuro:

El avance de la acústica está cada vez más vinculado a la transformación digital. En los próximos años se prevé una mayor precisión en softwares de simulación y predicción, incluso la integración de realidad aumentada (RA) y realidad virtual (VR) en la simulación auditiva. Paralelamente, el desarrollo de nuevos materiales y técnicas avanzadas abrirá nuevas posibilidades en el diseño. Además, el auge del arte generativo audiovisual marcarán una nueva etapa, ya que las herramientas como TouchDesigner (Ableton, 2023) permiten visualizar fenómenos sonoros de manera interactiva abriendo nuevas vías para el diseño basado en datos acústicos.

Figura 21. CLAUDE. (2021). Ableton & TouchDesigner: How to Build Audiovisual Live Set [Fotografía]. En glitch.cool.

1.3.2 Por qué el entorno sonoro importa.

El sonido constituye una vía fundamental para experimentar y comprender el mundo en todas sus facetas. De hecho, la primera experiencia sensorial del mundo que tiene el ser humano es a través del sonido: alrededor de la semana 20 de gestación, el feto comienza a oír, percibiendo el latido del corazón materno y, a través de él, establece su primer vínculo con el entorno. Estos sonidos iniciales no resultan placenteros por su contenido, sino porque representan familiaridad y seguridad (Van Kamp & Woudenberg, 2024).

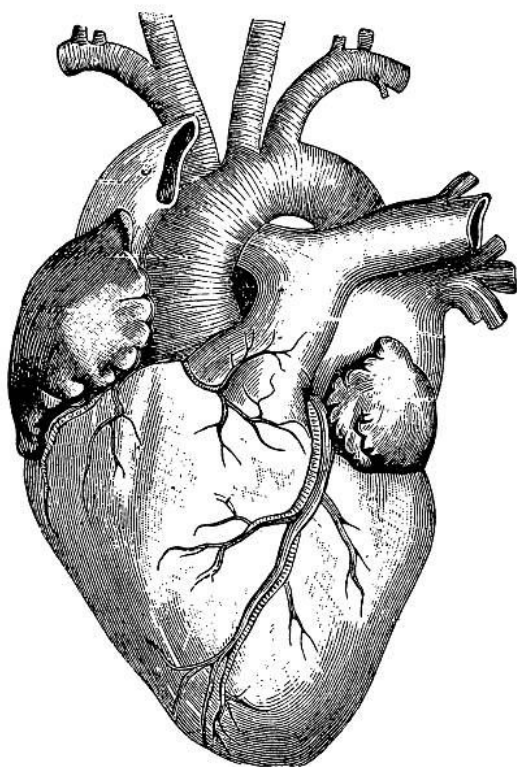
A lo largo de la evolución, los animales (incluyendo a los humanos), han desarrollado la capacidad de extraer información valiosa a partir de eventos acústicos. Gracias al sistema auditivo se puede identificar el origen de un sonido, estimar su distancia, su dirección y en caso de repetición, su velocidad. Por el contrario, se filtran estímulos sonoros que se consideran irrelevantes, relegándolos a un segundo plano. A veces, solo se nota su presencia cuando desaparecen, como el zumbido constante de un electrodoméstico que cesa de pronto. Aprender a discriminar entre los sonidos que merecen atención y los que no, es una capacidad esencial del sistema (Van Kamp & Woudenberg, 2024).

Debido a que las personas están constantemente escuchando el entorno sonoro que las rodea, sean o no sean plenamente conscientes de ellos, estos sonidos influyen a nivel fisiológico y psicológico, afectando las capacidades de interacción o concentración, entre otras. Por este motivo, el diseño de espacios arquitectónicos debe considerar el entorno acústico como una dimensión fundamental para mejorar la calidad de vida (BAUX, 2021).

SALUD Y BIENESTAR

La exposición prolongada al ruido no solo ocasiona daño auditivo, sino que también tiene efectos profundos sobre la salud y el bienestar. El ruido activa respuestas de estrés agudo en el cerebro, desencadenando la liberación de hormonas como la adrenalina y el cortisol. A largo plazo, esta activación continua puede contribuir a problemas como ansiedad, depresión, y un mayor riesgo de enfermedades cardiovasculares. En cambio, se ha demostrado que pasar tiempo en entornos acústicamente equilibrados promueven una mejor salud física y mental (reduciendo estrés y presión arterial, la fatiga y beneficiando a la recuperación cerebral). Un estudio realizado en Estados Unidos concluyó que una reducción de tan solo 5 decibelios en el ruido ambiental podría disminuir la prevalencia de hipertensión un 1,4%, y de enfermedades coronarias un 1,8%, lo que supondría un ahorro de casi 4000 millones de dólares en gastos de atención sanitaria (BAUX, 2021).

Un entorno acústico bien diseñado favorece:



- » Menor tensión y mayor relajación.
- » Disminución de la presión arterial.
- » Reducción de los niveles de cortisol y adrenalina.
- » Aumenta la capacidad de regeneración celular cerebral.
- » Mejor sistema inmunitario y mejor calidad de sueño.
- » Mayor energía sostenida.
- » Curación y recuperación acelerada.

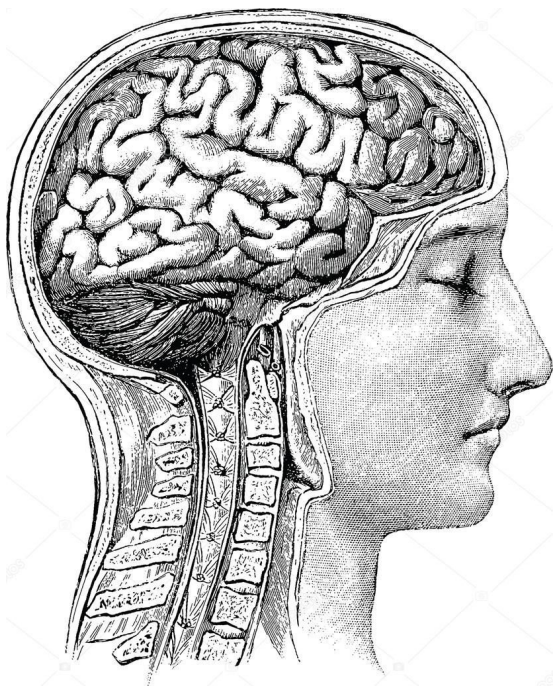
Figura 22. NSA Digital Archive. (2009). Corazón Aislado [Ilustración].
En iStockPhoto.

CONCENTRACIÓN Y PRODUCTIVIDAD

En la mayoría de los espacios de trabajo actuales, la concentración es clave para la productividad. Sin embargo, las distracciones sonoras - cómo el sonido del teléfono, conversaciones cercanas, timbres o ruidos mecánicos- interrumpen la atención, y puede tomar hasta 25 minutos en volver a un estado de foco. La pérdida de atención no solo afecta el rendimiento en la producción y los resultados del aprendizaje, sino también en la calidad de las interacciones sociales y la satisfacción con el entorno. Un ambiente acústico diseñado para favorecer la concentración puede mejorar significativamente el desempeño (BAUX, 2021).

En oficinas con condiciones acústicas optimizadas se han registrado los siguientes resultados:

- 48% de mejora en la capacidad de concentración.
- 51% de reducción en distracciones por conversaciones.
- 10% menos de errores.
- 27% menos de síntomas de estrés laboral.



Un entorno acústico adecuado permite:

- » Mejor: toma de decisiones y mejor comportamiento.
- » Menos errores laborales.
- » Mayor disposición para interactuar con los demás y mayor satisfacción laboral.

Figura 23. Edith and Peter O'Donnell Awards. (2021). Cerebro [Ilustración]. En Pinterest.

APRENDIZAJE Y EDUCACIÓN

La capacidad de atención prolongada en un aula está influida por factores acústicos. Escuchar con claridad al docente sin interferencias es fundamental para un aprendizaje efectivo. No obstante, muchas aulas se enfrentan a problemas como exceso de ruido y deficiente tratamiento acústico. Además, los niveles altos de sonido afecta a la salud de los docentes, teniendo riesgo de dañar sus cuerdas vocales y su audición. Según una investigación realizada por el Instituto Escolar Interdisciplinaria en Alemania, más del 80% de los encuestados declaró experimentar estrés a causa del ruido generado por el alumnado. Estudiantes con necesidades educativas especiales son particularmente susceptibles a una mala acústica. Un estudio en Reino Unido demostró que la reducción del tiempo de reverberación en las aulas condujo a una mejora significativa en la conducta, la retención de información, el compromiso con el alumnado y la disminución del estrés del profesorado (BAUX, 2021).

Un entorno acústico bien diseñado en entornos educativos promueve:

- » Mayor capacidad de concentración y comprensión lectora.
- » Menor estrés cognitivo y tensión vocal.
- » Mejor retención de información y memoria a corto plazo.
- » Reducción del riesgo de pérdida auditiva.

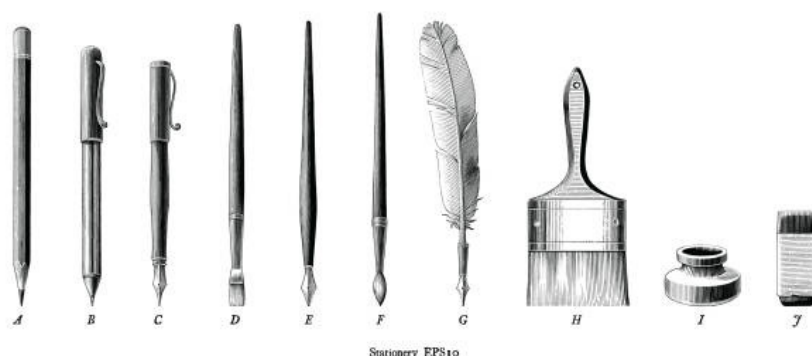


Figura 24. Channarongsds. (2020). Grabado antiguo de papelería [Ilustración]. En iStockPhoto.

SEGURIDAD Y PROTECCIÓN

En espacios públicos compartidos, como estaciones o aeropuertos, los niveles de ruido influyen directamente en la seguridad. Un entorno acústico mal diseñado puede dificultar la inteligibilidad del habla, lo que representa un riesgo en situaciones donde las instrucciones deben comprenderse con claridad (ya sean por un sistema de alarma de voz o un anuncio público por megafonía). Asimismo, el ruido excesivo puede aumentar los errores humanos y promover comportamientos agresivos en personas predispuestas. Se ha demostrado que el “comportamiento de ayuda” se disminuye en entornos donde el sonido supera los 80 dBA. Incluso los niños expuestos a altos niveles de ruido muestran signos de indefensión aprendida (BAUX, 2021).

Un entorno acústico bien diseñado se traduce en:

- » Mejor inteligibilidad del habla, autoconciencia y autorregulación emocional.
- » Menor irritabilidad y molestia.
- » Mayor capacidad de toma de decisiones.



Figura 25. Nastasic. (2018). Llamada de teléfono antiguo [Ilustración]. En iStockPhoto.

1.3.3 Los patrones visuales del sonido: Figuras de Chladni.

En el siglo XIX, las fuentes de producción sonora eran limitadas, los medios disponibles eran la voz humana, los instrumentos musicales, los cañones y otros dispositivos explosivos, así como fenómenos naturales como los sonidos de animales o los truenos. No resulta extraño, por lo tanto, que los temas abordados por el físico alemán Ernst Chladni se estudien desde una perspectiva musical. Los grandes avances de la acústica teórica durante el siglo XVIII pueden atribuirse, en parte, a la coincidencia de intereses entre mecenas, investigadores y un público oyente (Chladni, 2015).

Entre la producción y detección de sonido se encuentra el trabajo de Chladni sobre placas vibratorias, que involucra no sólo la producción de sonido sino la técnica experimental de identificación de las vibraciones (Chladni, 2015). En 1782, Chladni comenzó a realizar extensos experimentos en su apartamento, llegando a escribir (Ullman, 2007): “Durante mucho tiempo, mi principal actividad fue analizar estas fuentes sonoras, que aún no se habían estudiado. Hasta entonces, solo las vibraciones de cuerdas y del aire en instrumentos de viento eran objeto de estudio. Ahora, realicé experimentos sobre las vibraciones transversales de varillas, que habían sido objeto de estudios teóricos de Leonhard Euler y Daniel Bernoulli, y posteriormente sobre las vibraciones de placas, un campo desconocido”.

¿QUÉ SON LAS FIGURAS DE CHLADNI ?

Las figuras de Chladni son patrones geométricos que se forman al esparcir un material granular, como arena o sal, sobre una placa vibrante. Estas figuras revelan los modos de vibración de la placa, donde la sustancia granulada se acumula en las zonas de menor vibración (nodos) y se desplaza de las zonas de mayor vibración (antinodos o vientres). Estas figuras son una forma visual de demostrar los patrones complejos de vibración de ondas estacionarias (el resultado de la interferencia de ondas sonoras).

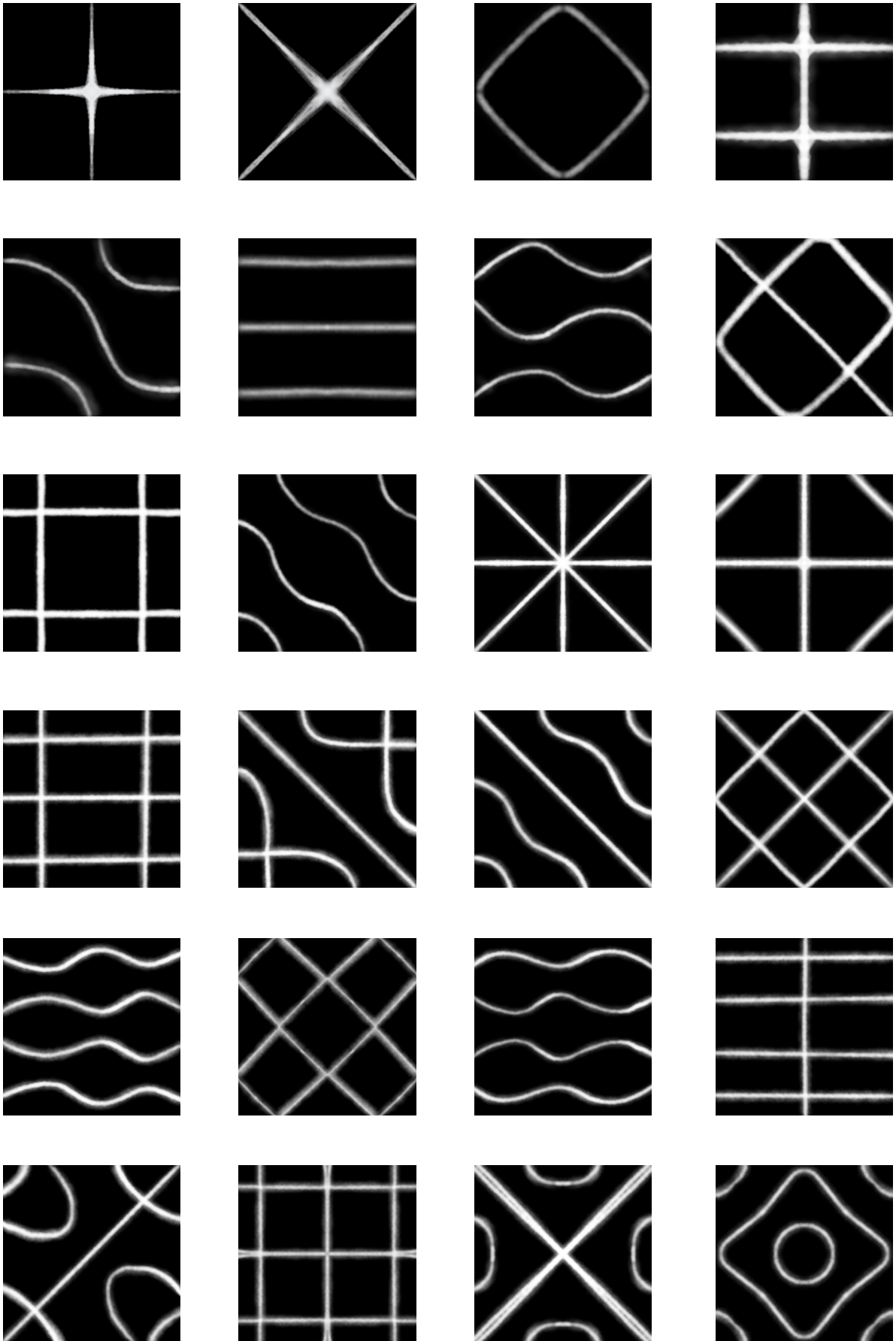
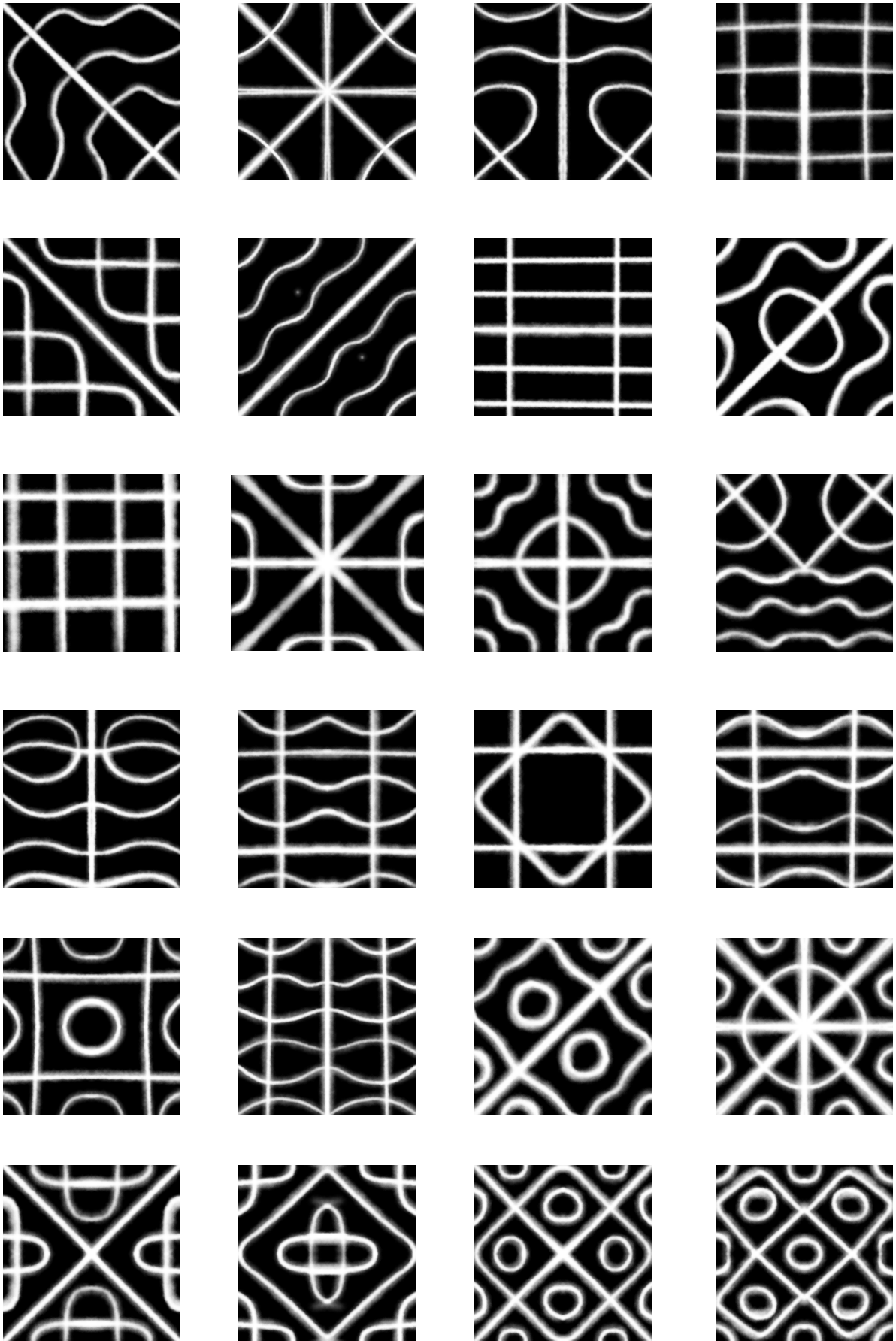


Figura 26. Figuras del libro Die Akustik, que muestran algunos de los patrones creados por la arena. Fuente: elaboración propia.



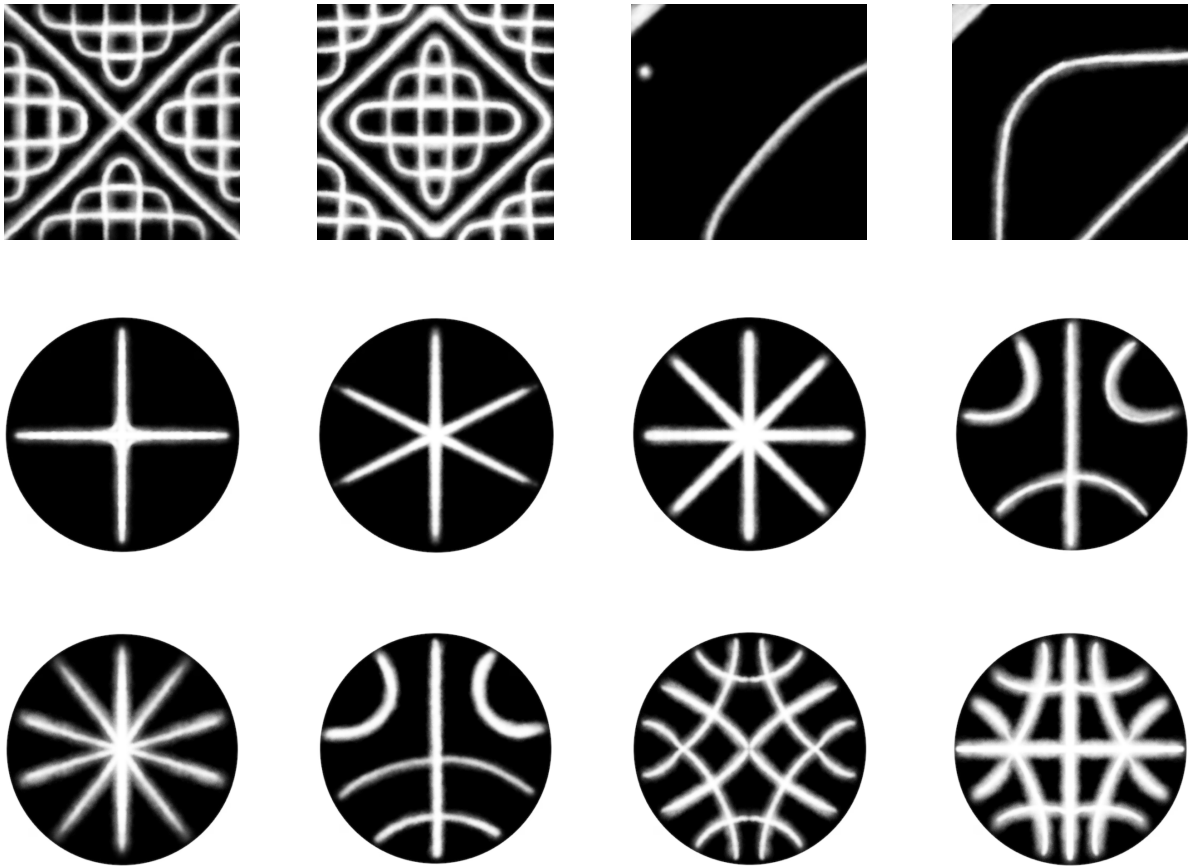


Figura 26. Figuras del libro *Die Akustik*, que muestran algunos de los patrones creados por la arena. Fuente: elaboración propia.

¿CÓMO FUNCIONAN?

En el experimento original las placas están fabricadas con hierro y se hacen vibrar mediante el roce con un arco de violín. Al pasar el arco sobre el metal, la placa resuena en una de sus frecuencias naturales. Sobre su superficie la persona que realiza el experimento espolvorea arena fina, que rebota debido a las vibraciones y termina depositándose en puntos nodales, es decir, en las zonas en las que no se produce movimiento, creando patrones complejos (Rees, 2018). Los patrones formados por estas líneas son los que ahora se denominan Figuras de Chladni. En su época Chladni los llamó *Klangfiguren* (figuras sonoras).

Esta técnica de visualización desarrollada por Chladni se recoge por primera vez en 1787 en su obra *Entdeckungen über die Theorie des Klanges* (Descubrimientos en la Teoría del sonido) y más tarde en su libro *Die Akustik*, publicado en 1802. En teoría cualquier placa puede vibrar en un número infinito de modos, cada uno asociado a una frecuencia de sonido concreta. Cada modo genera un patrón único, cuya complejidad aumenta a medida que lo hace la frecuencia de vibración. La forma de los patrones también está determinada por otros factores, como la geometría de la propia placa. Las ilustraciones incluidas en la obra de Chladni ofrecen una muestra representativa de la diversidad formal que estos patrones pueden adoptar (Rees, 2018).



VIDEO SOBRE EL EXPERIMENTO

Cymenatics: Chladni Plata- Sound, Vibration and Sand

Autor: Nigel John Stanford

SIMULACIÓN MATEMÁTICA

Según Paul Burke, se pueden simular los patrones de Chladni para una placa cuadrada de lado L , restringida en el centro mediante la siguiente ecuación:

$$\cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right)\cos\left(\frac{m\pi y}{L}\right) - \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{L}\right) = 0,$$

En la ecuación N y M son números enteros. Esta expresión describe las líneas nodales (es decir, los ceros) de una onda estacionaria (Ponce Campuzano, 2025).

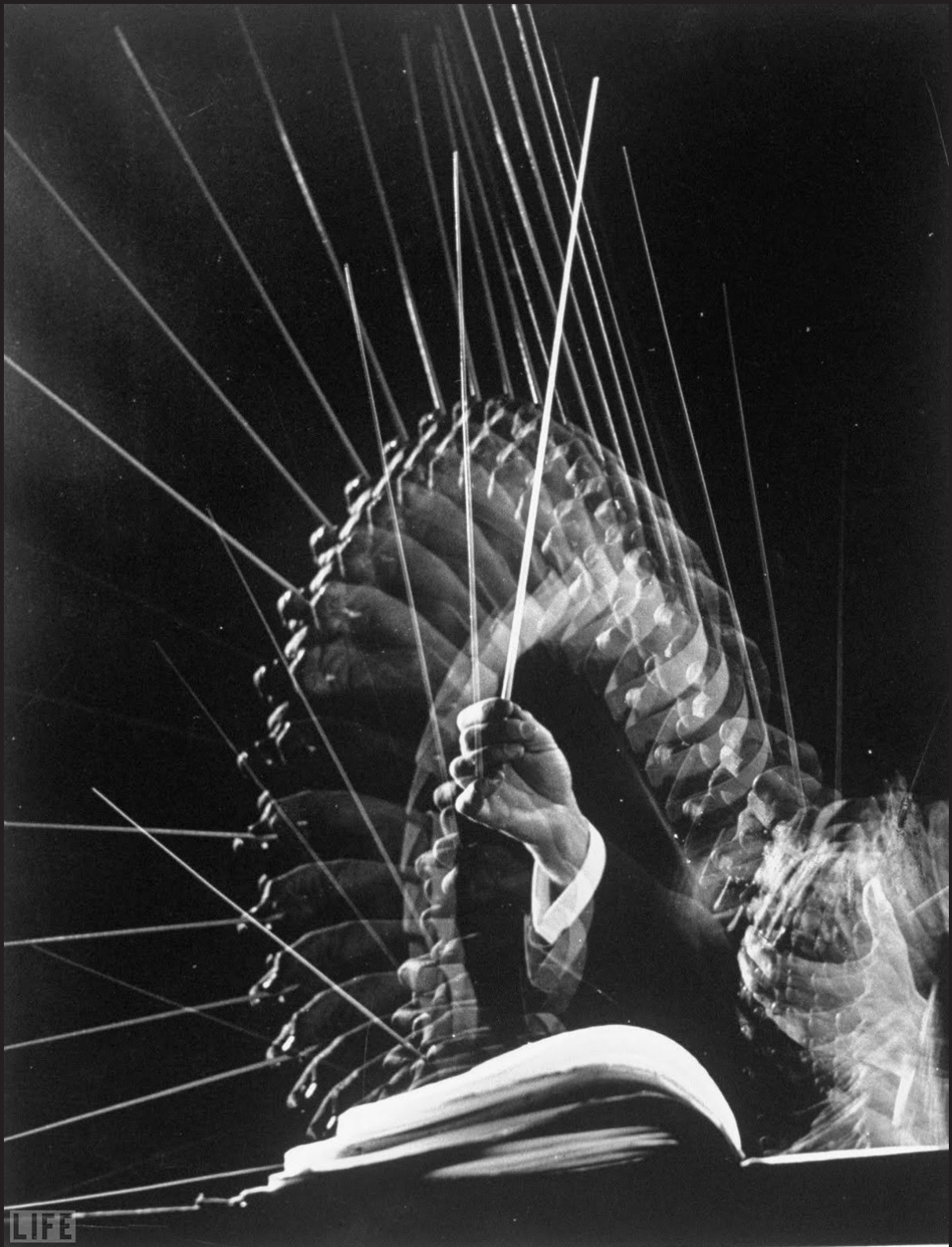


Figura 27. Mili, G. (1945). Manos del director de orquesta Efrem Kurtz mientras dirigía [Fotografía estroboscópica]. En Pinterest.

CAPÍTULO 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 OBJETIVO GENERAL.

El presente estudio tiene como objetivo general “construir la onda sonora”, usando el sonido como materia generativa, y empleando las Figuras de Chladni cómo base para generar la propuesta. A través de herramientas de diseño paramétrico, se busca traducir estas formas generadas por la vibración del sonido en diseño 3D, obteniendo piezas que puedan actuar como soluciones de acondicionamiento acústico.

Se explora así la relación entre sonido, forma, diseño paramétrico y materialización.

Por lo tanto, esta investigación plantea la hipótesis mencionada en la introducción: ¿es posible diseñar para el sonido desde el propio sonido? ¿Puede la onda sonora estacionaria ser materializada y construida?.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Para alcanzar el objetivo general del trabajo se plantean los siguientes objetivos específicos que comprenden tanto la investigación teórica cómo la aplicación práctica:

1. Estudiar el fundamento físico-matemático de las Figuras de Chladni, investigando las ecuaciones y fenómenos de resonancia que generan los patrones vibratorios para poder recrear el experimento.
2. Explorar herramientas de diseño paramétrico, en particular el uso de Geometry Nodes en Blender, cómo medio para traducir las ecuaciones en geometrías tridimensionales manipulables.
3. Desarrollar un sistema de generación formal que permita modificar y adaptar los diseños a distintos contextos.
4. Producir prototipos digitales para su fabricación, asegurando la viabilidad técnica de las formas generadas para impresión 3D.
5. Realizar pruebas de impresión 3D con parte de los modelos generados, con el objetivo de analizar su viabilidad constructiva.
6. Reflexionar sobre la posibilidad de integrar estos diseños cómo paneles de acondicionamiento acústico en la arquitectura contemporánea.

2.3 LIMITACIONES DEL PROYECTO.

A pesar del interés en el trabajo, existen una serie de limitaciones que han condicionado el alcance del proyecto, que se deben reconocer para acotar los resultados obtenidos y enmarcar posibles desarrollos futuros.

1. Tiempo limitado: el proyecto se ha realizado en el marco temporal de un cuatrimestre universitario, lo cuál ha restringido la profundidad en ciertas fases relacionadas con la experimentación prolongada.
2. Recursos económicos: la ausencia de financiación específica ha impedido la obtención de materiales acústicamente óptimos para la impresión en 3D, el desarrollo de prototipos en escala real y la realización de ensayos acústicos en laboratorio especializado de las piezas obtenidas (en concreto el Laboratorio de Ensayos No Destructivos Atalante), por lo que la evaluación del rendimiento acústico de los prototipos se ha basado en criterios teóricos y visuales. Por este motivo, las pruebas de viabilidad se han centrado en impresiones 3D en pequeña escala, empleando los recursos disponibles de manera autogestionada.
3. Alcance disciplinar: debido a que el estudio parte de la disciplina arquitectónica, se han priorizado los relacionados con la exploración de la forma, teniendo que dejar fuera un desarrollo exhaustivo desde un punto de vista más físico-científico.
4. Complejidad computacional: el uso de herramientas como el Geometry Nodes implicó una curva de aprendizaje significativa que condicionó el desarrollo dentro del plazo dado.

2.4 BENEFICIOS DEL PROYECTO.

Este estudio pretende aportar una visión innovadora al campo del diseño acústico, proponiendo una metodología creativa en el que el propio sonido se convierte en generador de forma. A través del estudio de las Figuras de Chladni y su traducción mediante diseño paramétrico, el proyecto puede ofrecer diferentes beneficios en relación con distintas perspectivas.

1. Innovación formal: se propone una nueva forma de concebir el diseño en la que la onda sonora deja de ser un dato invisible para transformarse en una geometría tangible y funcional, con posibles aplicaciones directas en el diseño acústico.

2. Fomento del diseño acústico consciente: se busca promover una mayor consciencia sobre la importancia de la calidad sonora del espacio, considerándose desde las primeras fases del proyecto arquitectónico.
3. Aplicación de herramientas paramétricas accesibles: el uso de software como Blender + Geometry Nodes, de código abierto, democratiza el acceso a técnicas de diseño avanzado, dando oportunidades a estudiantes e investigadores sin acceso a programas que requieran licencia.
4. Unión entre distintas ramas: se pretende favorecer una aproximación interdisciplinar (física, música/sonido y arquitectura) para estimular nuevas formas de creación.
5. Potencial de aplicación real en espacios arquitectónicos: las geometrías generadas pueden ser adaptadas.
6. Propuesta replicable y abierta a futuras investigaciones: la metodología es escalable y reproducible, permitiendo que en investigaciones posteriores se pueda profundizar en distintos apartados.

2.5 METODOLOGÍA.

El siguiente estudio se estructura a través de un enfoque teórico-práctico. Para llevarlo a cabo se desarrolla mediante los siguientes puntos:

- En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica de libros, revistas especializadas, artículos académicos y científicos obtenidos en fuentes fiables a nivel internacional para generar el marco referencial que permita entender el tema en cuestión.
- En segundo lugar se realiza un acercamiento teórico al fenómeno físico que da origen a las Figuras de Chladni, comprendiendo los principios que lo rigen. Se incluye la investigación de las ecuaciones matemáticas asociadas.
- En tercer lugar, se procede con la exploración computacional mediante el diseño paramétrico desarrollando definiciones capaces de generar formas basadas en las Figuras de Chladni. Posteriormente se diseñan varios prototipos digitales de placas para impresión 3D, en esta fase se trabaja la estabilidad estructural de la pieza para que sea realizable.
- En último lugar, se realiza la fabricación de prototipos mediante fabricación 3D en pequeña escala, usando los materiales disponibles.

2.6 RECURSOS REQUERIDOS.

- » Miro: pizarra virtual que permite realizar la lluvia de ideas general del trabajo.
- » Blender: creación del prototipo en placas imprimibles.
- » Geometry Nodes: realización del diseño paramétrico en un sistema basado en nodos para definir y generar la geometría.
- » Procreate: creación de los elementos gráficos.
- » Mybib: gestión de las referencias bibliográficas en APA 7.
- » Google Docs: redacción del borrador.
- » Adobe Indesign: maquetación del documento.
- » Microsoft Excel: computar las horas trabajadas.



Figura 28. NASA. (1972). Dos trabajadoras de la NASA en una cámara anecoica o de absorción de sonido [Fotografía]. En NASA Sound Chamber.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 INTRODUCCIÓN.

El objetivo de las soluciones acústicas es corregir o mejorar la acústica de un espacio para que cumpla su función y sus objetivos, optimizando la experiencia acústica global. El tratamiento acústico consiste en cambiar el sonido dentro de la habitación para que sea más claro; transformando la dinámica de cómo se mueven las ondas sonoras dentro de un espacio (BAUX, 2021).

La forma de un panel acústico influye en su eficacia para controlar el sonido, principalmente en lo que respecta a la absorción y difusión acústica.

¿Qué es la difusión acústica?

La difusión ocurre cuando la dureza y textura del material y objeto son similares a la longitud de onda del sonido. La manera en la que se difunde depende de la textura de la superficie. La difusión excesiva dificulta la localización de la procedencia del sonido. (BAUX, 2021).

Los difusores de sonido dispersan y reflejan de manera uniforme en un espacio la energía sonora. Su objetivo es mejorar la calidad del sonido existente en un espacio, no elimina el sonido ni lo minimiza. Cuando la onda sonora entra en contacto con un difusor se generan interferencias al encontrarse con superficies irregulares de distinta profundidad. De esta manera, en el momento que el sonido se refleja y entra de nuevo en la habitación, no rebota en la misma dirección en la que proviene, sino que se distribuye en múltiples direcciones, cubriendo un área mayor. Los difusores tienen diversas texturas y formas, pudiendo diseñarse a medida para crear un efecto especial en contextos de escucha crítica, como estudios o salas de concierto (BAUX, 2021).

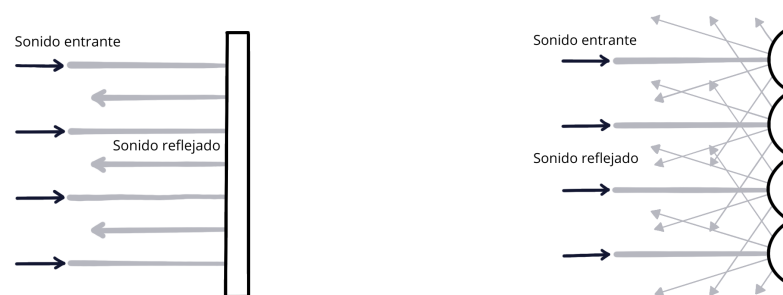


Figura 29. Diagramas de la difusión acústica basados en el libro BAUX The Book of Acoustics.
Fuente: Eleboración propia

Tipos:

1. Paneles curvos
2. Difusores cuadrapiramidales
3. Difusores piramidales
4. Difusores policilíndricos
5. Difusores cuadráticos
6. Difusores diseñados a medida

Se usan para:

- Reducir ecos, reflexiones y la focalización del sonido.
- Evitar las ondas estacionarias.
- Mejorar la riqueza de sonido de un espacio y crear una sensación de amplitud.
- Proporcionar una cobertura sonora más amplia para el habla o la música.
- Mejorar la inteligibilidad y la claridad del habla.

¿Qué es la absorción acústica?

La absorción acústica se produce cuando una onda sonora entra en contacto con un objeto o material y parte de su energía es retenida en lugar de reflejada. Esta energía retenida se transforma en calor dentro del material. La cantidad de energía que es absorbida o que continúa transmitiendo depende tanto del grosor como de las propiedades físicas del material en cuestión (BAUX, 2021).

Los absorbentes acústicos están diseñados para capturar la energía sonora y reducir su reflexión dentro de un espacio. Tradicionalmente, se fabrican con materiales porosos y fibrosos, como espuma, lana mineral y textiles, aunque también pueden utilizarse materiales menos convencionales como madera o metal. La capacidad de absorción de estos materiales varía según la frecuencia, por lo que existe una amplia gama de formas, estilo y grosor para satisfacer los distintos requisitos de absorción (BAUX, 2021).

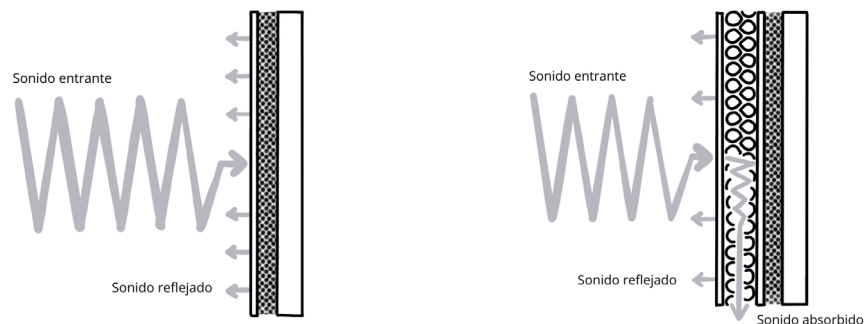


Figura 30. Diagramas de la absorción acústica basados en el libro BAUX The Book of Acoustics.
Fuente: Elaboración propia

Hay 3 tipos de absorbentes:

1. Absorbentes porosos: transforman la energía en calor al amortiguar la oscilación por fricción. Ejemplo: textiles, alfombras, lana mineral, yeso aireado y espuma de célula abierta.
2. Absorbentes de panel: formados por materiales flexibles que vibran frente al impacto del sonido. Funcionan gracias a que su interior cerrado está ocupado por volumen de aire, donde la energía sonora queda atrapada. Ejemplos: paneles de madera, yeso, metal y plástico con lana mineral o espuma en su interior.
3. Resonadores: compuestos por materiales perforados que capturan la energía sonora dentro de orificios o ranuras de distintas profundidades. Esta energía queda atrapada y se transforma en oscilación (vibración mecánica). Los resonadores actúan como absorbentes selectivos, absorben principalmente un rango estrecho de frecuencias, por lo que se personaliza su diseño para que reduzca este conjunto en específico de frecuencias. Entre los materiales más comunes se encuentran: la madera perforada, el metal y los paneles de yeso.

Para una absorción acústica óptima suelen preferirse formas irregulares o porosas con superficie elevada. Estas formas aumentan el área superficial efectiva permitiendo atrapar más ondas sonoras (capturando un rango más alto de frecuencias) y convirtiéndolas en calor, reduciendo ecos y reverberación. Las formas piramidales, de cuña y los diseños multifacéticos son eficaces para absorber una amplia gama de frecuencias (MUMU DESIGN, 2024).

Las figuras de Chladni, con su forma multifacética e irregular, pueden considerarse adecuadas para diseños en el campo del tratamiento acústico.

- » Presentan zonas elevadas y nodales que generan una superficie no uniforme, similar a difusores acústicos o paneles piramidales.
- » Replicar estas irregularidades en materiales porosos o semirrígidos crearía una superficie compleja para absorber y dispersar el sonido, especialmente en frecuencias medias y altas.
- » Al reproducir las zonas nodales tridimensionalmente se incrementa el área superficial expuesta al sonido, lo que favorece la absorción.
- » Esto encaja con el principio de mayor superficie= mayor contacto con la energía sonora= más absorción y disipación en forma de calor.

3.2 DISEÑO PARAMÉTRICO.

3.2.1 ¿Qué es el diseño paramétrico?

El diseño paramétrico es una metodología de diseño mediante ordenador que utiliza algoritmos y parámetros para generar y manipular formas y estructuras complejas de un modelo. Se basa en las relaciones entre líneas, figuras o cantidades (Stevens Curl & Wilson, 2015). El ajuste de estos parámetros genera automáticamente nuevas variaciones, lo que facilita la exploración eficaz de múltiples opciones de diseño. Siendo esto una diferencia notable con el modelado directo, en que se crea y modifica manualmente la geometría. Entre sus beneficios se encuentra la flexibilidad, eficacia y precisión. La aplicación de esta metodología se puede encontrar en campos como la arquitectura, ingeniería, diseño de producto, diseño gráfico, etc.

Este tipo de diseño se desarrolla utilizando programas de modelado tridimensional. Para la realización de este trabajo se ha utilizado Geometry Nodes, una herramienta del software Blender (una suite de creación 3D gratuita y de código abierto), que permite desarrollar diseño paramétrico generando geometrías mediante un sistema visual basado en nodos.

3.2.2 Geometry Nodes: funcionamiento.

Geometry Nodes es un sistema para modificar la geometría de un objeto con operaciones basadas en nodos. Se accede a él añadiendo un Geometry Nodes Modifier (Blender, 2025).

Funciona de la siguiente manera:

- **Nodos:** la base del funcionamiento del sistema, cada uno tiene tomas de entrada y salida.
- **Flujo de datos:** los datos (puntos, caras, aristas, etc) fluyen de un nodo a otro a través de las tomas. Cada nodo procesa los datos según su función.
- **Representación:** los nodos interconectados forman un árbol de nodo, proporcionando un esquema visual del proceso. Si un árbol de nodos se conecta a un modificador es un Node Group.

Conceptos clave:

- Group Input: simboliza la geometría inicial (ej: un cubo o una esfera) que entra en el árbol de nodos.
- Group Output: simboliza la geometría final modificada que se genera desde el árbol de nodos.
- Modificadores: los nodos de geometría se aplican como modificadores a los objetos en Blender.
- Procedural: la configuración de los nodos permite realizar cambios no destructivos, lo que significa que se pueden ajustar los parámetros y ver los resultados en tiempo real sin alterar permanentemente la geometría original.

Un resumen, un árbol de nodos de geometría conectado a un modificador es un Node Group. La geometría del estado anterior al modificador (la original) se pasa al nodo Group Input. Seguidamente, el grupo de nodos puede operar sobre la geometría y pasa un output al node Group Output, dónde se pasará al siguiente modificador (Blender, 2025) .

Los nodos de geometría pueden modificar diferentes tipos de geometría: mallas, curvas, nubes de puntos, volúmenes e instancias (Blender, 2025).

3.2.3 Simulación de los patrones de Chladni.

Desarrollo de la ecuación

Para realizar la simulación de los patrones de Chladni y su conversión en geometrías tridimensionales manipulables, se emplea la ecuación presentada en el apartado 1.2.3 correspondiente a una placa cuadrada del lado L.

El proceso comienza añadiendo un plano en Geometry Nodes sobre el cuál se desarrollará la geometría, seguido de la creación de un nuevo grupo en el editor de notas. Una vez configurado el modelo base, se procede con la implementación de la matemática que da la forma.

$$\cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right)\cos\left(\frac{m\pi y}{L}\right) - \cos\left(\frac{m\pi x}{L}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{L}\right) = 0,$$

En la ecuación X e Y son las coordenadas de posición, L representa la longitud de la placa, y las variables N y M se usan para crear diferentes patrones.

El primer paso para introducir la ecuación es determinar el punto de origen, que lo marcan los valores X e Y, pues son la posición. Para ello, se coloca un nodo de posición unido a un nodo Separate XYZ. De este nodo XYZ salen 4 ramas: dos correspondientes a las operaciones con la variables X y otras dos correspondientes con la variable Y.

La ecuación se recrea aplicando nodos matemáticos. Para abordar la sección del primer coseno se añade un nodo matemático con función de multiplicación, en este momento se busca multiplicar X por pi, por lo tanto en los valores de ese nodo se escribe 3.142 (la constante pi) y se enlaza con la variable X.

A continuación se añade otro nodo de multiplicación que se conecta con el valor anterior y se multiplica por la variable N definida en el Group Input. Con ello se obtiene $N\pi X$.

El siguiente paso es la división, por lo que se crea un nuevo nodo matemático con función de división que se conecta con el valor anterior y se enlaza con L, situada en el Group Input.

Como resultado, se tiene la ecuación contenida en el primer paréntesis, solo quedando obtener el coseno. Para ello, se añade un nuevo nodo matemático con función de coseno y se une al último valor. De este modo se completa la primera parte de la ecuación: el coseno de X por pi por N dividido por L.

Para realizar las otras tres parte de la ecuación se repite el mismo proceso cambiando las variables N/M y X/Y. Una vez realizado, la próxima acción es multiplicar los dos primeros cosenos entre sí y luego los siguientes dos cosenos, que también se multiplican entre sí. Con este fin, se insertan dos nodos matemáticos de multiplicación: el primero se enlazará con los resultados de los primeros dos cosenos y el segundo enlazará con los resultados de los dos últimos.

El paso siguiente es restar la segunda parte de la ecuación a la primera. De nuevo, esto se puede realizar con un nodo matemático de resta que se conecta con el resultado de las dos multiplicaciones anteriores.

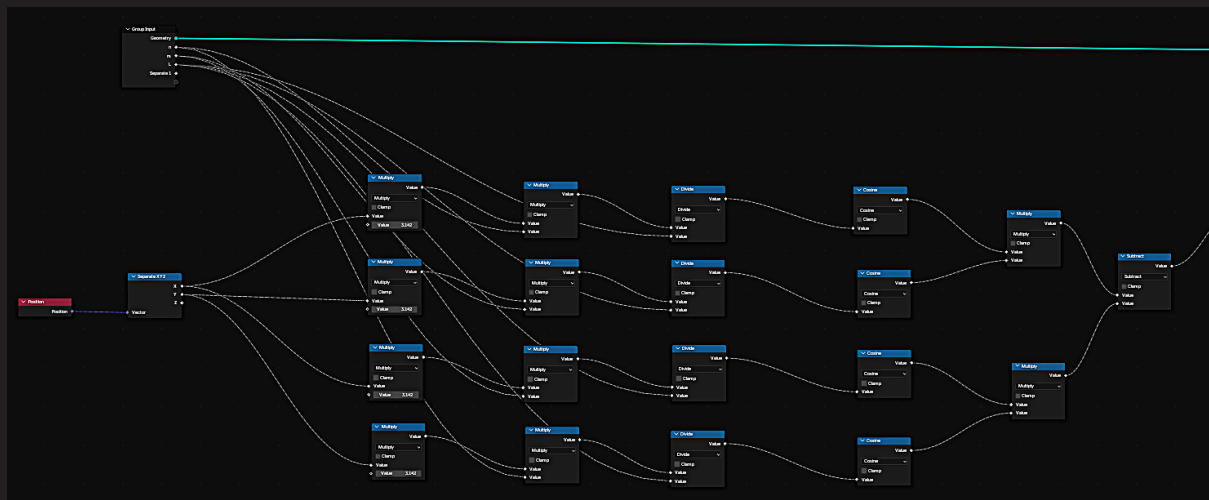


Figura 31. Transcripción de la ecuación en nodos. Fuente: elaboración propia.

En este momento la ecuación está terminada. Sin embargo, no se visualiza, pues para ello hay que conseguir resolución en el modelo y configurar las variables. La resolución se logra subdividiendo el plano en el modelo de edición. Las variables se configuran en el menú de modificadores, por el momento se establece la longitud (L) en 1, el valor M en 5 y el valor N en 1.

El último nodo de resta se conecta con un nodo matemático de valor absoluto, este lee el valor de entrada sin importar su signo, convirtiendo los valores negativos en positivos, generando líneas visuales en la placa que siguen los patrones de Chladni.

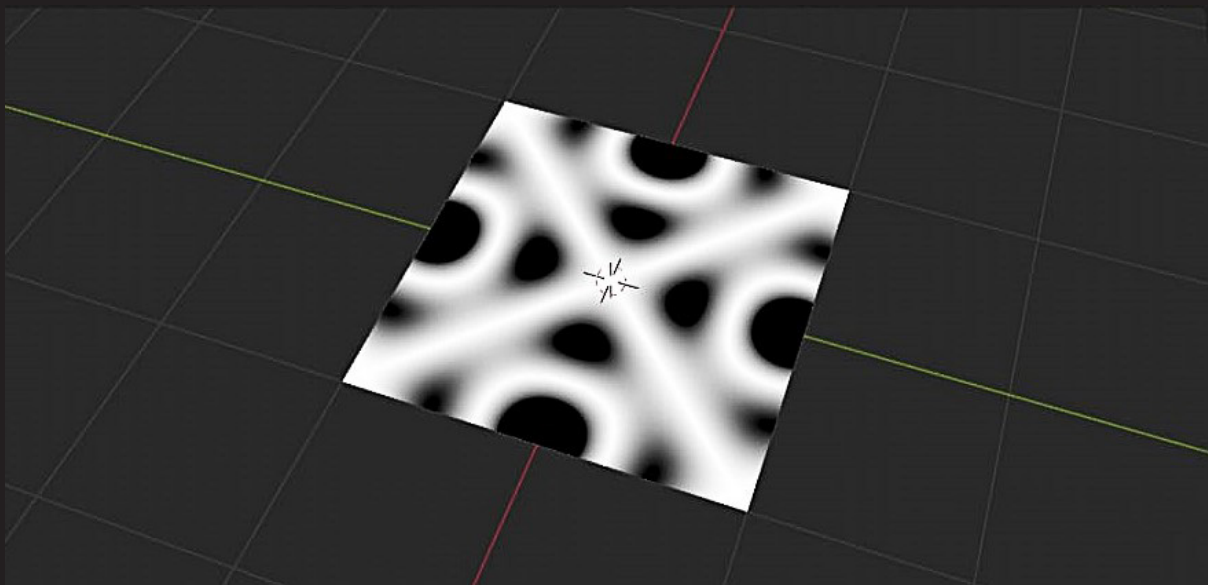


Figura 32. Líneas visuales en la placa. Fuente: elaboración propia.

La siguiente parte en la simulación consiste en transformar la imagen bidimensional generada en la placa en una nube de puntos distribuida en un espacio tridimensional, que representa el comportamiento de la arena en el experimento físico original. Para determinar las zonas hacia las cuáles debe desplazarse la arena, se genera un mapa normal, el cuál permite simular con mayor detalle la superficie.

A continuación, se procede a distribuir los puntos y alinearlos con el patrón que se ha creado. Para lo cual se inserta un nodo de Distribute Points on Faces que coloca puntos en la superficie del objeto geométrico de entrada (Blender, 2025). Se fija la densidad con un valor elevado, a unos 1000, para tener muchos puntos. Además, se le añade un nodo de Set Point Radius para controlar el tamaño con el que se mostrará cada punto de la nube de puntos en la ventana gráfica (Blender, 2025). Por ahora se configura el radio a 0,01 m. Con esto se consigue tener los puntos de dispersión.

A fin de mover los puntos de dispersión al patrón generado, se utiliza la normal previamente almacenada en Normal Attribute (el vector asociado a cada punto que indica la dirección perpendicular a la superficie en esa ubicación). Puesto que hay dos formas de lograr este proceso, se opta por explorar ambos métodos.

MÉTODO 1

En el método 1 se implementa el mapa normal que se ha creado anteriormente. Los mapas normales son mapas de texturas que codifican la información de la dirección de la superficie.

Para aplicarlo se inserta un nuevo nodo de Group Input, que permite poder utilizar más variables, y un nodo matemático de multiplicación. Este nodo de multiplicación se enlaza con dos nodos: con una nueva variable del Group Input llamada Separate 1, y con el valor de un nodo Absolute definido con anterioridad. A continuación se coloca un nodo Combine XYZ y se conecta la salida del nodo de multiplicación al valor X e Y.

Seguidamente, se emplea el Normal Attribute que se almacenó colocando un Named Attribute que se configura en la normal guardada. Acto seguido, se incorpora un nodo de operación matemática vectorial de multiplicación para conectar los valores resultantes de los nodos previos. El valor de salida se usa para establecer la posición de los puntos al conectarse con la entrada Offset (desplazamiento) del nodo de Set Position.

Finalmente el nodo de Set Position se enlaza con el nodo del Group Output y con el nodo Viewer para poder observar el resultado de este método.

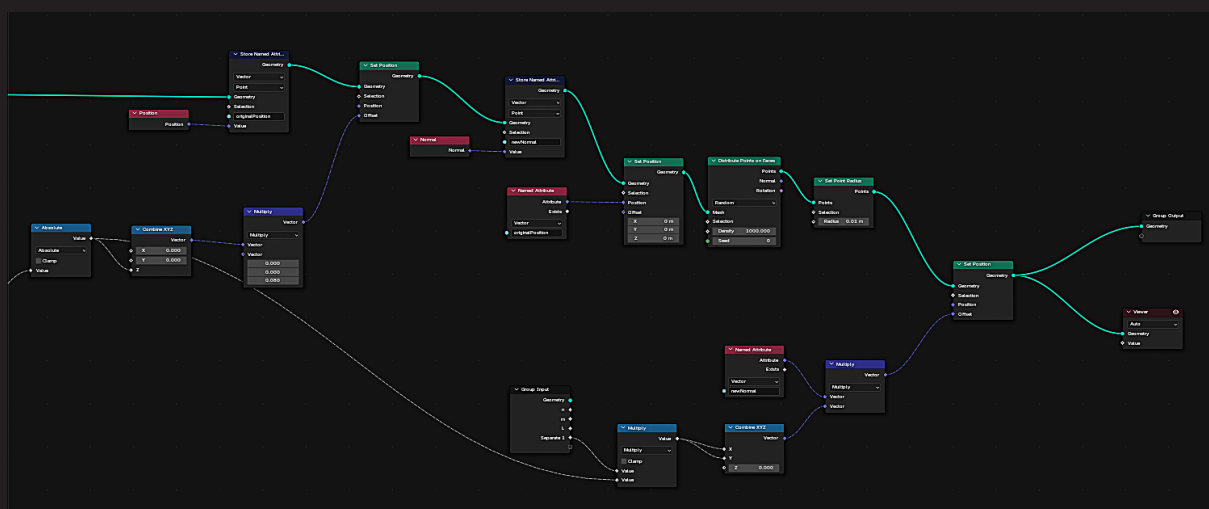


Figura 34. Nodos finales del método 1. Fuente: elaboración propia.

En el caso del método 1, la estructura completa del árbol de nodos se presenta de la siguiente forma:

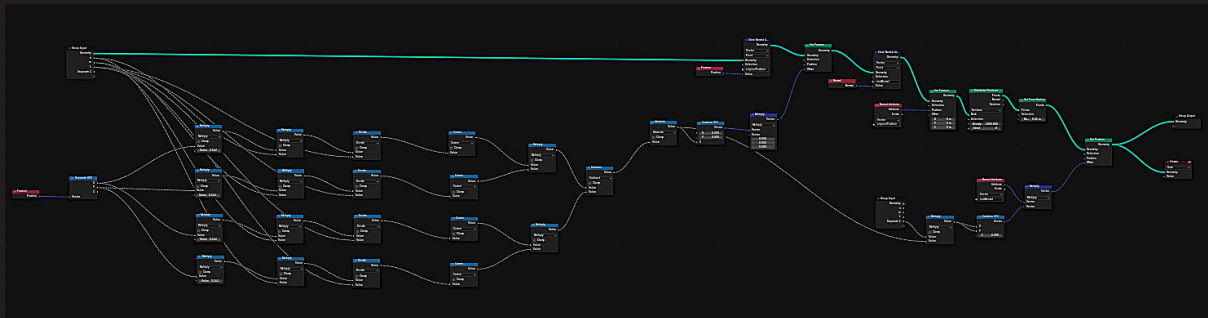


Figura 35. Árbol de nodos del método 1. Fuente: elaboración propia.

A medida que se ajustan los valores de la variable Separate 1, el modelo cambia de forma siguiendo el patrón de las Figuras de Chladni. No obstante, el resultado presenta una apariencia algo tosca y no permite desarrollar una gran diversidad de formas, por lo que se decide continuar desarrollando el segundo método.

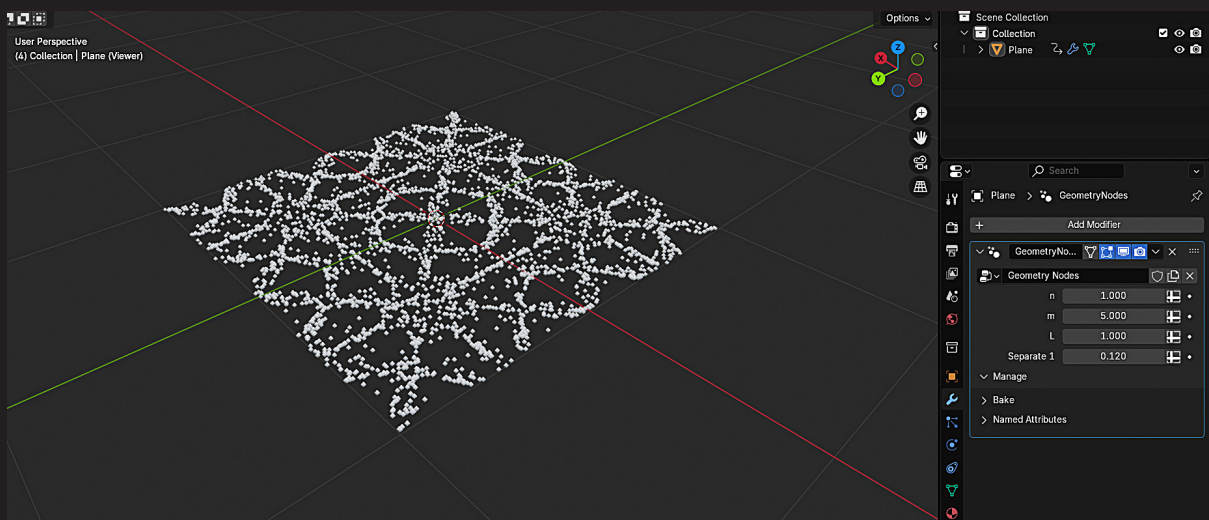


Figura 36. Visión del resultado del método 1. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se muestra la secuencia de cómo se distribuyen los puntos empleando este método.

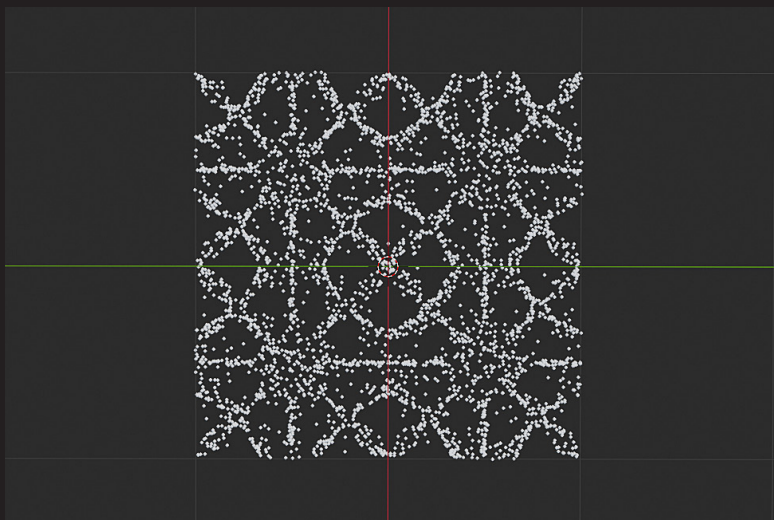
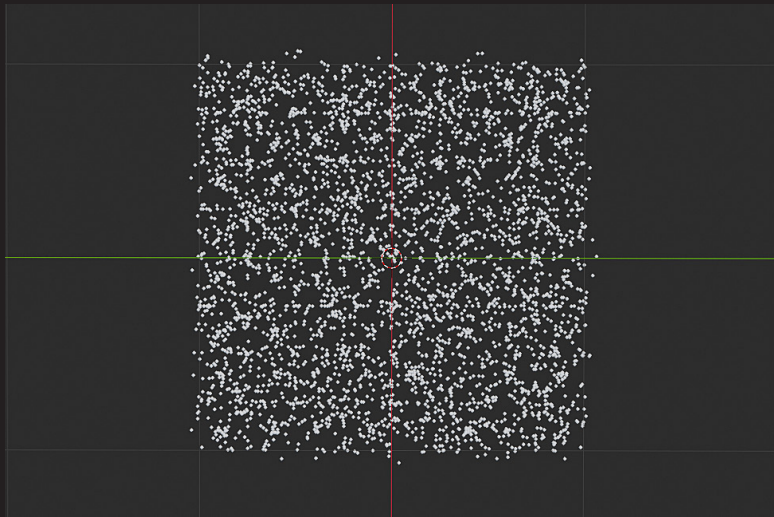
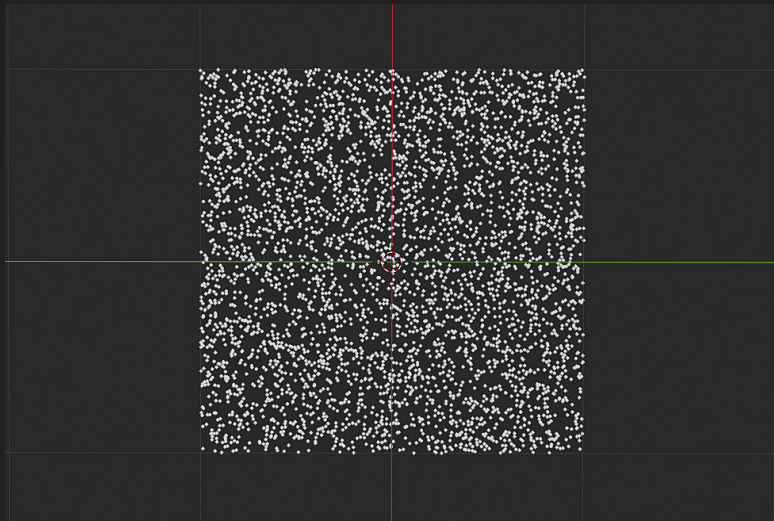


Figura 37. Secuencia método 1. Fuente: elaboración propia.

MÉTODO 2

En el método 2 se recurre a la proximidad geométrica como principio base. Se vuelve a los cálculos previos utilizando la salida del nodo resta (Subtract). A esta salida se enlaza un nodo de comparación que se establece en modo Not Equal (invierte la relación visual anterior, con el patrón en negro y el área vacía en blanco) y y este, a su vez, se vincula con un nodo de Delete Geometry (elimina de forma selectiva las partes no deseadas de la geometría). El resultado de la operación es la obtención del patrón puro, libre de zonas vacías. Esta geometría procesada se emplea para reubicar los puntos que originalmente no se encontraban dentro del patrón. Para lograrlo, se introduce un nodo Geometry Proximity, que calcula la posición más cercana a la geometría objetivo (Blender, 2025) .

El valor de posición obtenido se vincula con un nodo Set Position, y juntos pueden establecer la posición de todos los puntos, lo que permite que los puntos se ajusten dinámicamente a la forma, incluso cuando esta se modifica. En el próximo paso, se incorpora un nodo Mix que permite controlar el grado de interpolación entre posiciones, el cuál se conecta al nodo de posición para lograr una transición fluida.

Finalmente, se aplica una nueva variable denominada Separate 2, la cual proporciona un control adicional sobre la modificación de la geometría, permitiendo adaptarla fácilmente al efecto deseado.

Para finalizar el proceso y lograr una integración coherente de todos los elementos, se introduce una textura de ruido, con el objetivo de generar movimientos aleatorios en las partículas. Esta variación se implementa mediante la incorporación de un Noise Texture, el cuál se une un nodo Map Range y a un nodo de multiplicación, lo que permite ampliar y ajustar el rango de valores utilizados por la textura.

Sin embargo, en una primera instancia el resultado no resulta satisfactorio: la textura de ruido se percibe demasiado intensa y no produce una variación aparente en las partículas. Por ello se introduce una textura de ruido para conseguir crear movimientos aleatorios con las partículas.

Para solucionar esta limitación, se incorpora un nodo Index, que asigna a cada punto un valor entero que indica la posición de cada elemento de la lista. Dado que en la simulación se le estableció mil puntos, el nodo cuenta de 0 a 999, otorgando un identificador único a cada partícula. Este valor individual permite que cada punto se encuentre en una fase distinta de la textura de ruido, generando variaciones más realistas. El nodo Index se enlaza a nodos matemáticos de suma y multiplicación, que permiten ajustar la intensidad y aleatoriedad.

Por último, la salida se vincula a los nodos Group Output y Viewer para visualizar el resultado final.

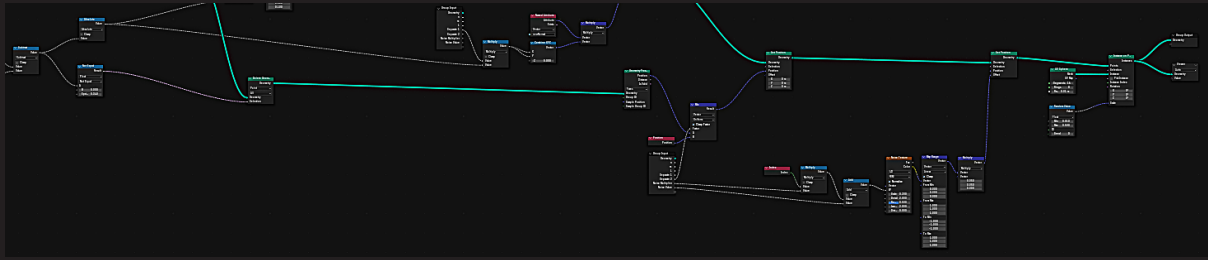


Figura 38. Nodos del desarrollo del método 2. Fuente: elaboración propia.

En el caso del método 2, la estructura completa del árbol de nodos se presenta de la siguiente manera:

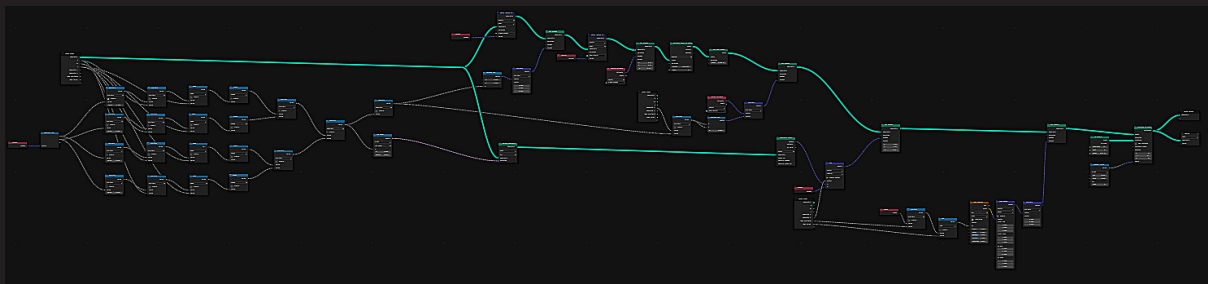


Figura 39. Árbol de nodos del método 2. Fuente: elaboración propia.

Esta metodología ofrece un resultado final más delicado y versátil, replicando de una manera más precisa las Figuras de Chladni.

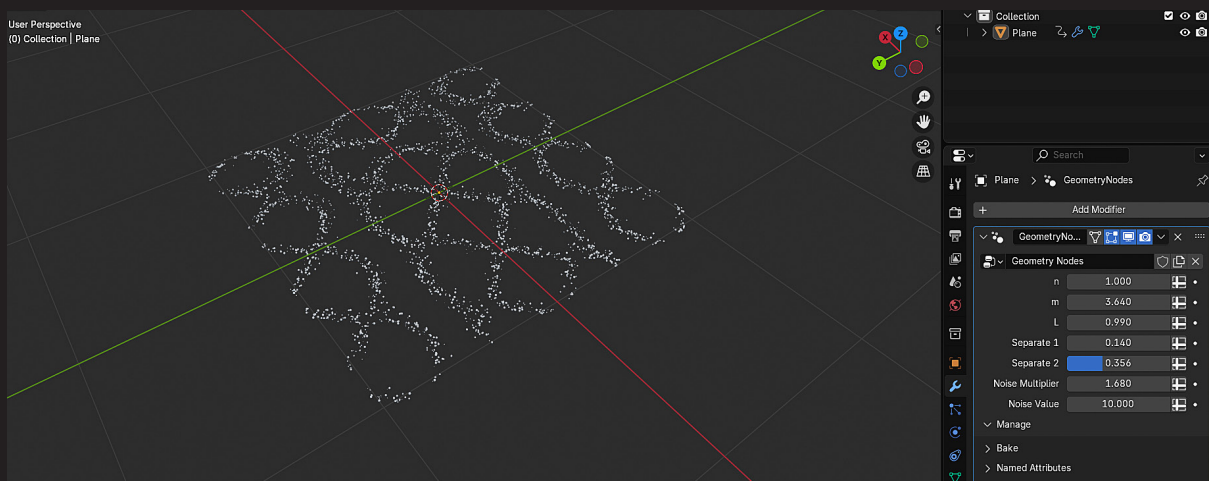
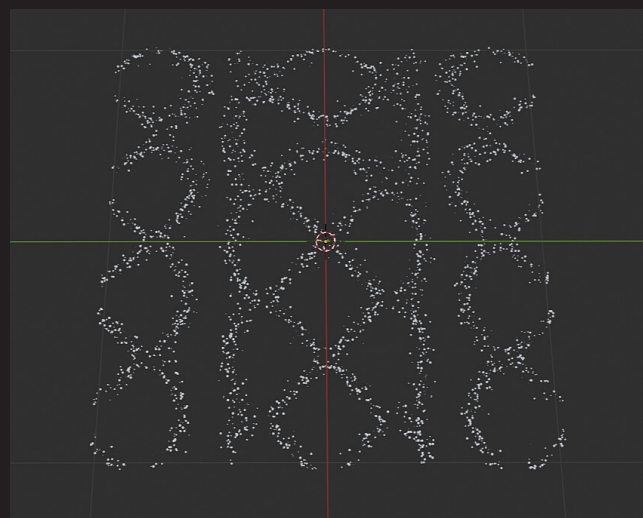
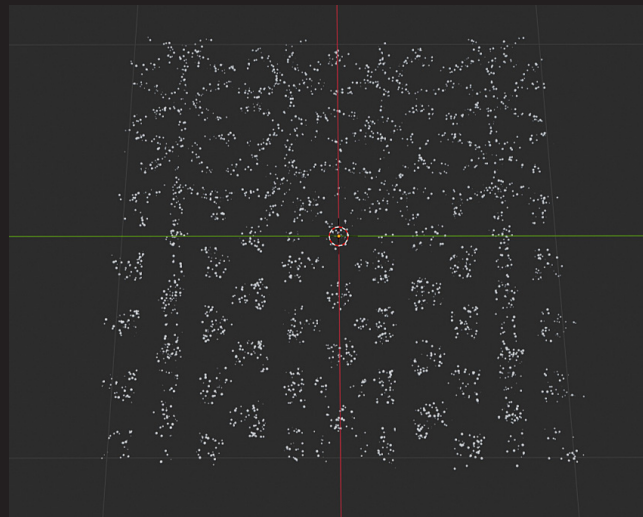
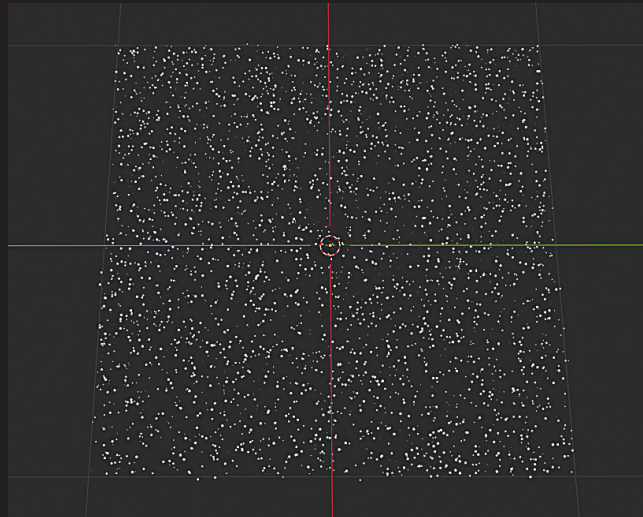


Figura 40. Visión del resultado del método 2. Fuente: elaboración propia.



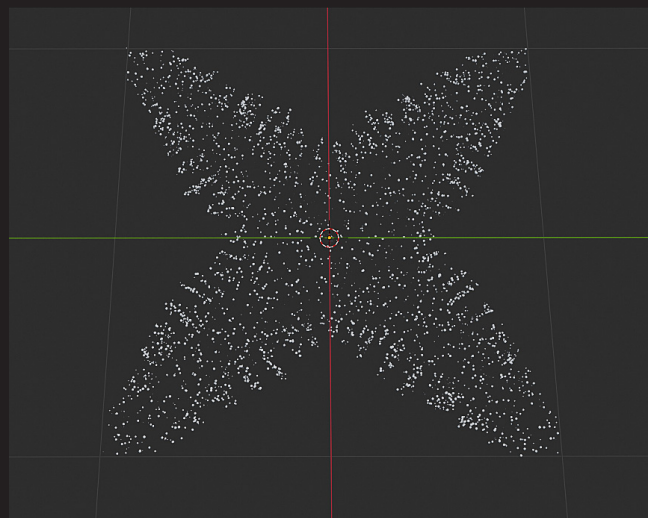
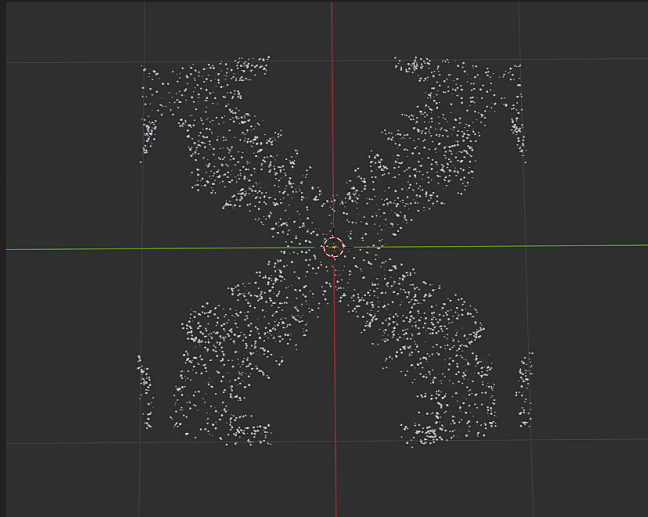
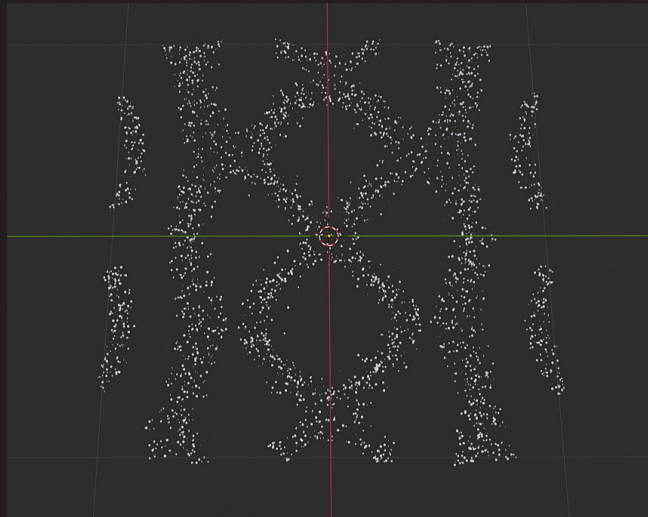


Figura 42. Secuencia método 2 con valores de L1.5, L3, L5. Fuente: elaboración propia.

3.2.4 Construcción de las placas.

A pesar de los avances alcanzados en el punto anterior, que permitieron simular el experimento de Chladni, el modelo generado por los métodos descritos está conformado por una nube de puntos abstracta, y no por una geometría sólida o material. Por lo tanto, este apartado se centra en averiguar cómo transformar dicha nube de puntos en una malla u objeto tridimensional concreto, que permita su manipulación y aplicación en procesos de definición formal y desarrollo proyectual, además de que mantenga la funcionalidad del sistema simulado.

Ensayo y error.

Después de varios intentos fallidos en los que se insertan diversos nodos, se alcanza una combinación funcional: entre los nodos finales de Instances to Points y el Viewer, se añade un nodo de Points to Volumen (que genera una esfera de volumen alrededor de cada punto de la geometría de entrada), seguido de un nodo Volume to Mesh (crea una malla en la superficie del volumen generado). Esta configuración convierte la nube de puntos en un objeto sólido, pero se ha perdido la forma deseada.

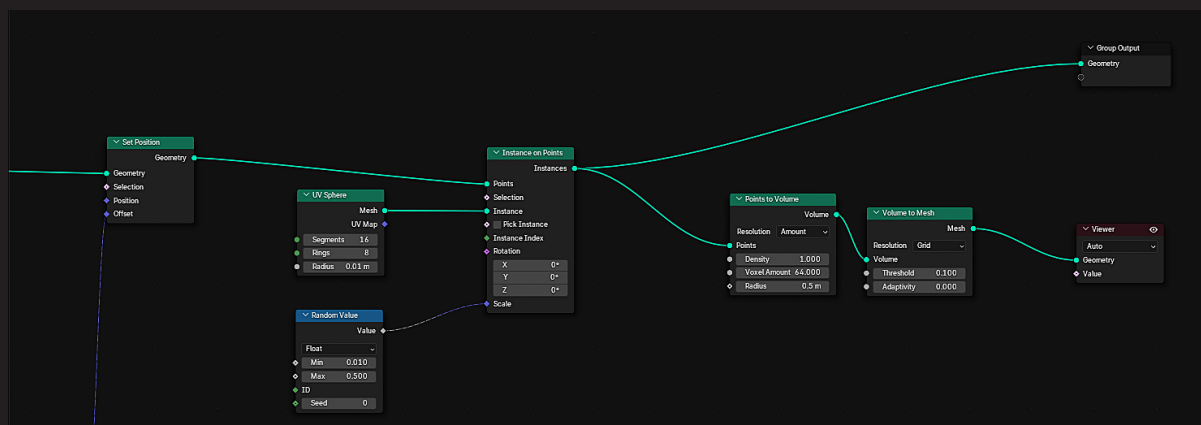


Figura 43. Nodos de desarrollo para materialización (intento 1). Fuente: elaboración propia.



Figura 44. Resultado en el que se pierde la forma (intento 1). Fuente: elaboración propia.

Para resolverlo, se añade un nodo Join Geometry, que fusiona las geometrías generadas por separado en una única estructura (Blender, 2025). Además, al ajustar ciertos parámetros - la densidad, el valor del voxel amount, el radio, y la resolución del nodo Volume to Mesh - se consigue refinar el resultado.

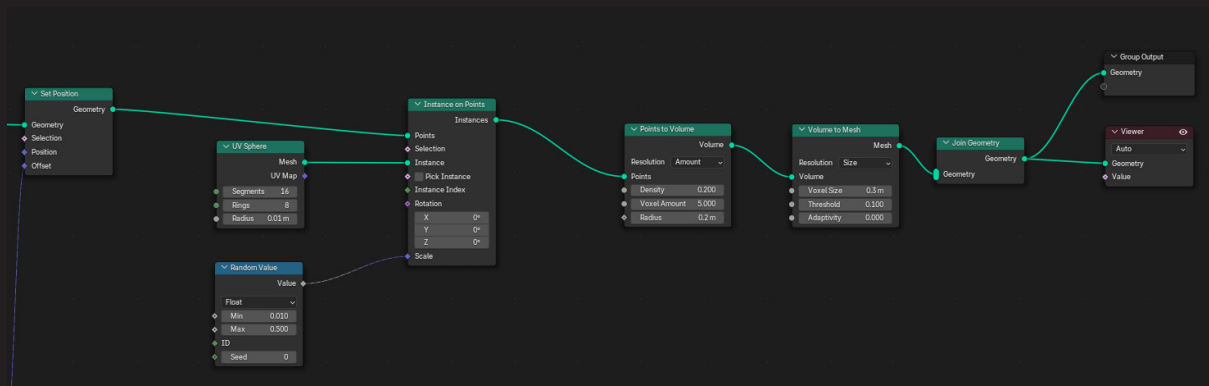


Figura 45. Nodos de desarrollo para materialización (intento 2). Fuente: elaboración propia.

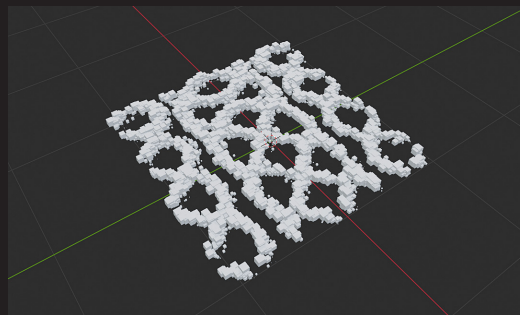


Figura 46. Resultado de la forma (intento 2). Fuente: elaboración propia.

Una vez alcanzado este punto, el modelo presenta una forma que puede ser desarrollada en la siguiente fase del proyecto.

Fabricación del soporte y obtención de una pieza final

En esta etapa del proceso, con el patrón del experimento de Chladni ya aplicado sobre una capa tipo Plane, se procede a incorporar una segunda capa, esta vez un Cube, que servirá como base de la placa.

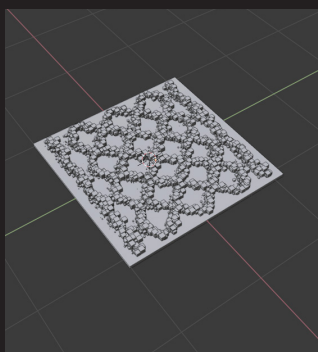


Figura 47. Pieza unificada.
Fuente: elaboración propia.

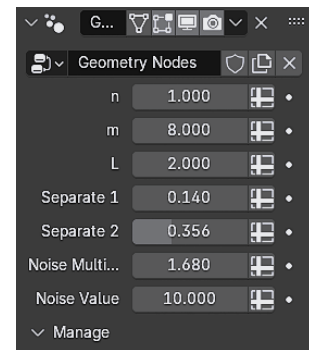
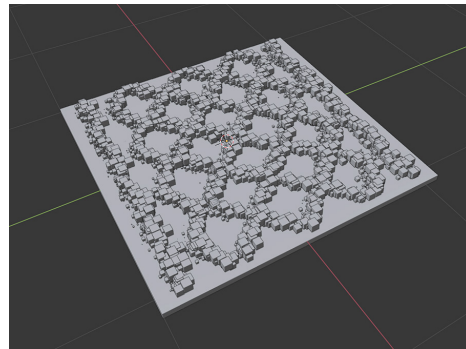
No obstante, al tratarse de dos objetos independientes, no es posible exportarlos directamente para fabricación aditiva. Para resolverlo, se recurre al apartado de modelado de Blender, dónde se realiza una operación booleana que fusiona ambos volúmenes en una sola geometría. El resultado es una pieza unificada, reconocida cómo único objeto, lista para poder ser exportada e impresa. A partir de aquí, es posible seguir explorando diversas variaciones formales.

3.3 EXPLORACIÓN DE LAS FORMAS: PROTOTIPOS.

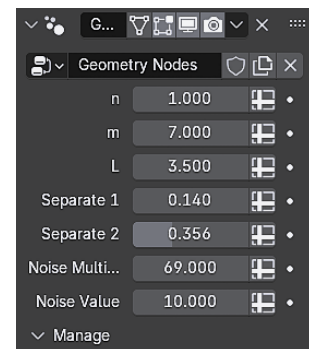
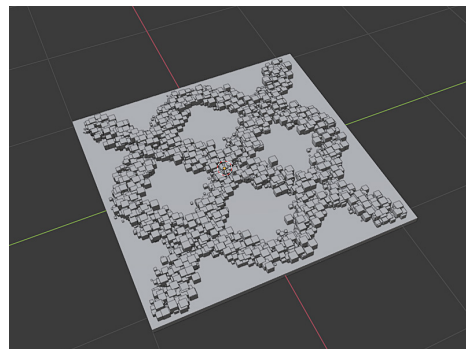
Debido a que en la simulación se establecieron distintas variables, basta con modificar sus valores numéricos para generar las diversas formas que pueden seguir las Figuras de Chladni.

A continuación, se presentan los modelos seleccionados como posibles candidatos a prototipos con sus datos.

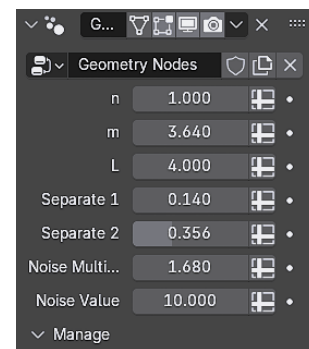
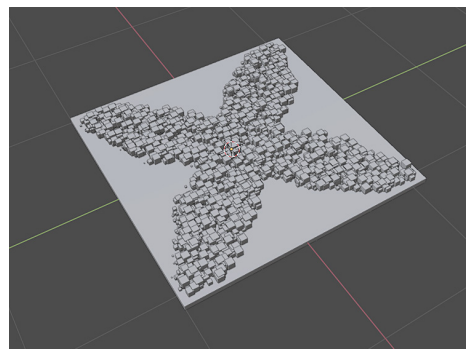
TIPO 1



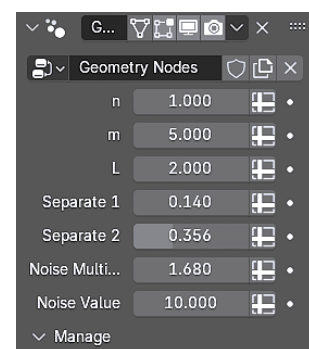
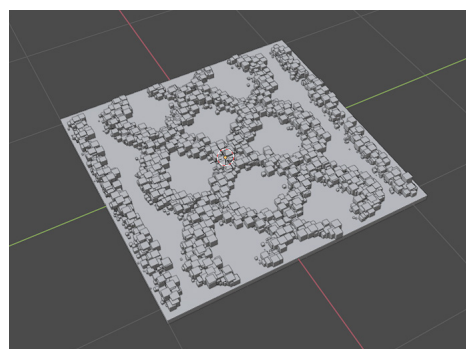
TIPO 2



TIPO 3



TIPO 4



Con los prototipos definidos, únicamente es necesario acceder al menú de archivo y exportarlos en stl para su fabricación.

3.4 IMPRESIÓN 3D Y MATERIALIDAD.



Una vez se obtienen los distintos modelos formales en stl se procede a materializarlos mediante impresión 3D. Para ello se opta por hacerlo con SLA, pues es la tecnología disponible. Se deciden imprimir 2 piezas para comprobar si los modelos de las placas son factibles. Cada pieza tuvo un coste de 15,5 euros, con unas dimensiones de modelo de 100 x 100 mm. La impresora empleada fue la LD-002R LCD de Creality.

Figura 49. Creality. (2025). Impresora 3D [Fotografía]. En MedicalExpo.

3.4.1 Realización con estereolitografía (SLA).

La estereolitografía, también conocida como SLA, es una técnica de fabricación aditiva para la impresión 3D, que utiliza resina líquida y un láser UV para crear objetos tridimensionales capa por capa. Es una de las primeras tecnologías de impresión 3D y destaca por su alta precisión.

La SLA es reconocida por su capacidad para producir finos detalles y acabados superficiales suaves, haciéndola ideal para prototipos, modelos y componentes complicados (Autodesk, 2023).

¿CÓMO FUNCIONA LA ESTEREOLITOGRAFÍA?

1. Preparación del diseño: se obtiene la geometría 3D a fabricar y se exporta el archivo en formato stl (la interfaz usada para traducir), un programa informático extrae la información de cada capa horizontal con su espesor en función de la precisión que se requiera.
2. Preparación de la resina: el proceso comienza con el llenado del tanque de la impresora con resina fotopolimérica líquida.

3. Impresión capa por capa: la impresora emplea un láser de precisión para solidificar selectivamente la resina, siguiendo las secciones transversales del modelo digital. La exposición al láser induce la fotopolimerización de la resina en zonas específicas de contacto.
4. Desplazamiento de la plataforma: una vez curada la capa, la plataforma de impresión se desplaza ligeramente hacia abajo, permitiendo que una nueva capa de resina cubra la superficie solidificada. Este proceso se repite sucesivamente.
5. Posprocesado: finalizada la impresión, la pieza se extrae del tanque. Las etapas del posprocesado incluyen el enjuague para eliminar restos de resina no curada, un curado adicional mediante luz ultravioleta y, en casos necesarios, acabados como lijado, pulido o aplicación de pintura.
6. Resultado final: el resultado es una pieza tridimensional de alta resolución, adecuada para el prototipado funcional y validación del diseño.

A fin de comprobar la posibilidad de materializar los modelos desarrollados en el apartado anterior, se procede a la impresión de dos de ellos. A través de esta técnica de fabricación, se busca verificar que el nivel de detalle obtenido corresponda al proyectado en los modelos 3D, demostrando así la factibilidad de impresión mediante la fabricación aditiva. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, reflejando un alto nivel de detalle en las piezas impresas. Este enfoque se fundamentó en un testeo orientado a la evaluación del modelo 3D.



PROTOTIPO 2

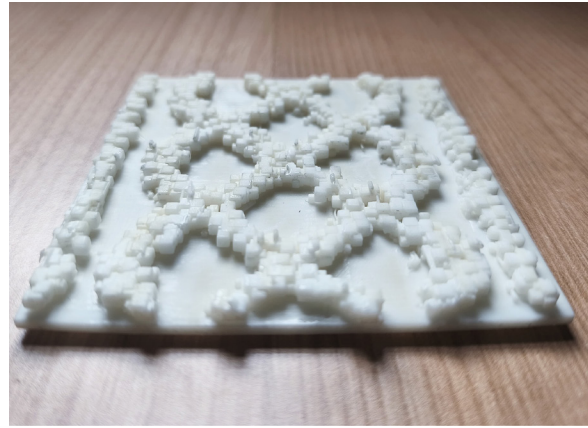


PROTOTIPO 4

Figura 50. Fotografías de la vista en planta de los dos modelos impresos en SLA.
Fuente: Eleboración propia



PROTOTIPO 2



PROTOTIPO 4

Figura 51. Fotografías de la vista en alzado de los dos modelos impresos en SLA.
Fuente: Eleboración propia

3.4.2 Alternativa material para las placas acústicas.

Fabricación aditiva con fieltro reciclado PET

La fabricación aditiva con fieltro, también denominada fieltro tridimensional (3D), es un proceso que emplea una técnica robótica de fieltro con aguja para construir objetos tridimensionales a partir de fibras de fieltro. Este proceso es similar a la impresión 3D, permitiendo la creación de formas complejas con propiedades personalizables en productos de fieltro, incluso pudiendo elaborar a partir de fieltro de PET reciclado.

Esta tecnología opera en tres dimensiones en vez de dos (correspondiente al fieltro tradicional), lo que posibilita que un mismo panel de fieltro presente distintas propiedades en su interior. El desarrollo de esta técnica aplicada a la fabricación de paneles acústicos y otros elementos de diseño arquitectónico ha sido llevada a cabo por investigadores del Taubman College of Architecture and Urban Planning de Estados Unidos (Aouf, 2019).

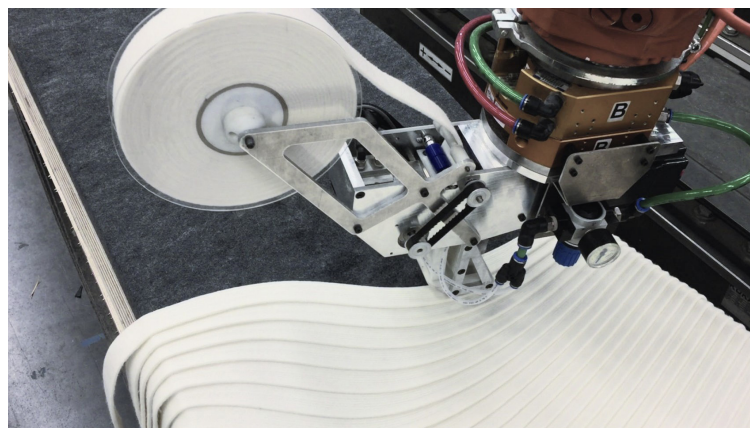


Figura 52. Aouf, R. S. (2019b). Robotic Needle Felting [Fotografía].
En Dezeen.

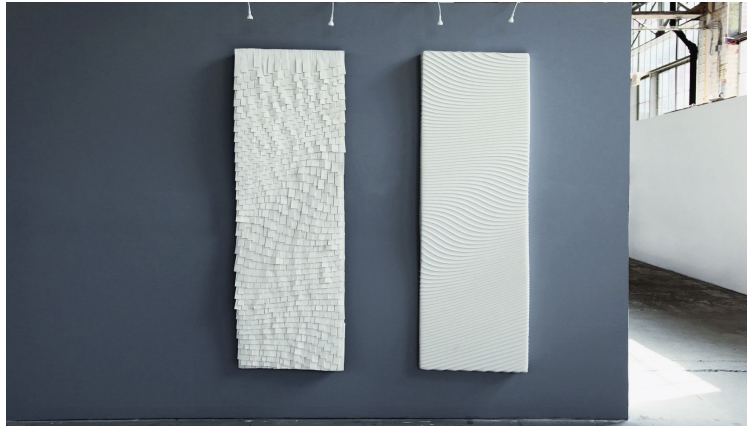


Figura 53. Aouf, R. S. (2019a). Acoustic panel with robotic needle felting [Fotografía]. En Dezeen.

¿Qué es el fieltro PET y cuáles son sus propiedades acústicas?

El fieltro PET se fabrica a partir de botellas de PET (tereftalato de polietileno) recicladas, de ahí su nombre, teniendo un impacto positivo en el medio ambiente al reducir los residuos. Con estas fibras se fabrican planchas de fieltro que están disponibles en distintos colores y grosores (Aimée, 2023).

El fieltro de PET tiene excelentes propiedades acústicas en lo que respecta a la amortiguación y la absorción del sonido. El coeficiente de reducción de ruido (NRC) es una medida de la absorción acústica, este material tiene un valor NRC de 0,85. Esto significa que es eficaz para reducir el ruido ya que cuánto más alto sea el valor con respecto a 1 el material absorbe mejor el sonido, y el fieltro de PET obtiene buenas puntuaciones en este aspecto.

Paneles acústicos realizados con micelio

Otra posibilidad emergente para la realización material de los paneles es mediante compuestos a base de micelio como una alternativa biodegradable para la absorción acústica.



Figura 55. Midwestgrowkits. (2024). Micelio [Fotografía]. En Parametric Architecture.

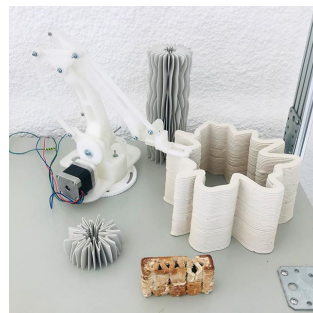


Figura 56. Blast Studio. (2024). Tree Column 3D-printed from mushroom [Fotografía]. En Parametric Architecture.

El micelio es la estructura vegetativa de los hongos, compuesta por una red de filamentos delgados llamados hifas. Estas hifas se ramifican y entrelazan, formando una extensa red. Los materiales compuestos elaborados a partir de micelio se generan cuando el crecimiento del hongo se interrumpe tras haber colonizado el sustrato, creando un material compuesto resultante. El micelio, en su búsqueda de nutrientes, se expande a través del sustrato formando una colonia en red. Durante este proceso segregan enzimas que descomponen la biomasa del sustrato en nutrientes, mientras que lo consolidan. Con el tiempo la materia orgánica se descompone a medida que los polímeros vegetales son sustituidos por la biomasa fúngica. La producción de compuestos a base de micelio implica el crecimiento del micelio sobre sustratos orgánicos (Walter & Gürsoy, 2022) .

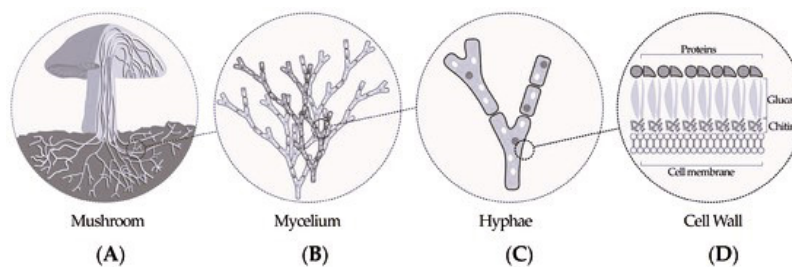


Figura 57. Mohseni, A., Rocha Vieira, F., Pecchia, J. A., & Gürsoy, B. (2023). Representación esquemática del micelio [Ilustración]. En Biomimetics.

Sin embargo, es importante señalar que, dado que la constitución material y las propiedades mecánicas de los compuestos cambian drásticamente, resulta difícil establecer protocolos fijos para los métodos de crecimiento y fabricación. En los estudios publicados sobre la evaluación de estos absorbentes acústicos a base de micelio, los resultados mostraron que los materiales compuestos a base de micelio son absorbentes eficaces, pero el rendimiento acústico varía entre las muestras en función del material del sustrato (Walter & Gürsoy, 2022).

A día de hoy hay empresas como Mogu que venden paneles acústicos para paredes interiores a base de micelio. Sin embargo, la empresa no revela sus metodologías de crecimiento para que esto sea recreable.

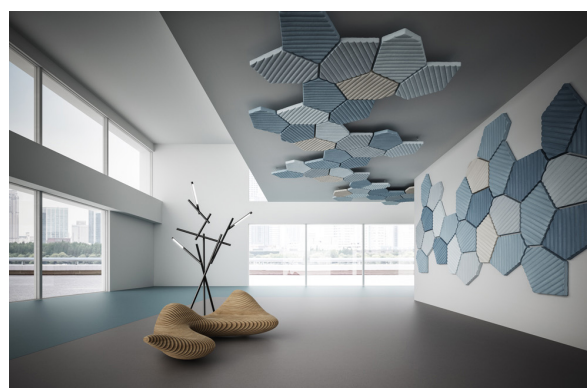


Figura 58. Mogu. (2025). Instalación de paneles Mogu Fields [Fotografía]. En Mogu.

3.5 CONSIDERACIÓN DE LA PROPUESTA.

La propuesta desarrollada en este trabajo parte de una serie de decisiones proyectuales que se han tomado en base a criterios obtenidos en la investigación teórica y los ensayos prácticos realizados durante el proceso. Los modelos presentados han sido diseñados en función de parámetros específicos que permiten simular las Figuras de Chladni en un entorno digital, para posteriormente materializarlas en técnicas de impresión 3D. Se reconoce, además, que estas soluciones mantienen un alto grado de adaptabilidad y escalabilidad, lo que permite su ajuste a distintas condiciones o requerimiento en desarrollos futuros.

Antes de plantear cualquier aplicación concreta o implementación en un contexto funcional de las placas acústicas, sería necesario realizar un estudio en profundidad del espacio en el que se pretenda utilizar, así como las condiciones de uso previstas. Esto implicaría considerar factores como el material más adecuado al espacio, el comportamiento acústico deseado, la finalidad del diseño, etc. Dado que esta investigación propone un diseño de placas que puedan destinarse a tratamiento acústico, resultaría imprescindible que dichas piezas (una vez fabricadas con el material apropiado) se sometieran a los ensayos acústicos correspondientes en un laboratorio especializado, con el fin de estudiar y validar su comportamiento conforme a las normativas específicas (como el Documento Básico HR de Protección frente al ruido, en el caso del marco español). Tales aspectos, exceden las competencias propias, por lo que se destaca la importancia de trabajar en colaboración con perfiles técnicos y científicos especializados, que puedan aportar el conocimiento necesario para afinar las decisiones de diseño.

Por otro lado, no se pretende que esta propuesta se limite a una reproducción estética del experimento de Chladni. Su desarrollo responde a una voluntad más amplia: entender cómo los fenómenos acústicos pueden ser traducidos a formas tangibles a través de herramientas digitales contemporáneas. A través del estudio de las Figuras de Chladni, se plantea una aproximación en la que la forma no surge únicamente por criterios visuales, sino por principios que responden a leyes naturales. De este modo, el trabajo busca abrir caminos para una integración entre disciplinas, fomentando un diseño informado y eficaz, en el que la estética y el rendimiento funcional convergen. Se ha planteado bajo la premisa de que una comprensión profunda del mundo físico puede enriquecer las estrategias proyectuales, dando lugar a soluciones que no solo son visualmente atractivas, sino óptimas en su comportamiento y respuesta ante el entorno.



Figura 59. Visualización 1 de posible resultado de la instalación de los paneles acústicos.
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

A lo largo de este Trabajo de Fin de Grado se ha investigado la relación entre un fenómeno natural cómo el sonido y su capacidad para generar geometrías con potencial estético y funcional dentro del ámbito arquitectónico. El estudio de las Figuras de Chladni ha servido como punto de partida para explorar cómo ciertos patrones de vibración pueden ser traducidos en formas tridimensionales mediante herramientas digitales cómo la unión del diseño paramétrico y la fabricación aditiva.

El trabajo ha alcanzado su objetivo principal: explorar la posibilidad de construir la onda sonora usando el sonido como materia generativa y tomando las Figuras de Chladni como base formal. Del mismo modo, se ha podido validar la hipótesis inicial, que planteaba la viabilidad de diseñar para el entorno sonoro a partir del propio fenómeno sonoro, demostrando que una onda sonora estacionaria puede ser no solo representada digitalmente, sino materializada y fabricada.

El uso de modelado algorítmico ha demostrado ser clave en la sistematización y exploración formal de estas geometrías, permitiendo obtener modelos precisos, versátiles y reproducibles que podrían adaptarse a diversos usos, como en el tratamiento acústico de espacios. Además estos modelos virtuales han demostrado que pueden ser realizables con impresión tridimensional. En esta línea, se ha abordado la búsqueda de materiales sostenibles compatibles con la propuesta, considerando el medioambiente para avanzar hacia una fabricación más responsable. Se han investigado opciones con materiales reciclados y compuestos orgánicos.

El proceso desarrollado ha sido una oportunidad para integrar competencias propias de la formación en arquitectura: análisis del entorno, conceptualización, empleo de herramientas digitales, construcción de modelos, reflexión crítica, etc.

No obstante, se reconoce que el paso de la experimentación al uso funcional de las piezas diseñadas requiere de una investigación con mayor profundidad, especialmente en lo relativo al testeo de materiales, dimensiones de la placa, mejora del rendimiento acústico y aplicación a contextos reales. Sería necesario disponer de recursos económicos y apoyo institucional que permitan ampliar el alcance del proyecto y establecer sinergias disciplinarias. Puesto que, si se desea utilizar estas placas como elementos de acondicionamiento acústico es fundamental la realización de ensayos en laboratorios y contar con la colaboración de perfiles expertos.

En definitiva, el trabajo busca un modelo de diseño informado, donde ciencia, tecnología y creatividad convergen para dar lugar a soluciones funcionales que muestran sensibilidad con el entorno. De este modo, se pone en valor el papel del diseño paramétrico no solo como un medio de formalización sino, como vía de investigación activa y responsable dentro del pensamiento arquitectónico.

CAPÍTULO 5. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como resultado de esta investigación, se abren diversas áreas de desarrollo y profundización.

1) Validación técnica y comportamiento acústico:

- Ensayos acústicos especializados: realizar pruebas de laboratorio que evalúen el comportamiento real de las piezas frente al sonido- absorción, difusión, reflexión-en función de las geometrías derivadas de las Figuras de Chladni.
- Simulación digital y contraste empírico: integrar herramientas de simulación acústica para contrastar los datos obtenidos digitalmente con los resultados físicos. Esto permitiría ajustar los modelos paramétricos para optimizar su rendimiento.

2) Materiales sostenibles y fabricación:

- Investigación de materiales: seguir explorando materiales sostenibles que sean compatibles con la impresión tridimensional y mejoren la calidad acústica (por ejemplo: la experimentación con fibras naturales y resinas).
- Prototipado funcional: fabricar piezas con materiales definitivos (cómo puede ser el fieltro PET) valorando su respuesta mecánica y su comportamiento ante el uso previsto, permitirá comprobar la viabilidad de una implementación real.

3) Desarrollo virtual avanzado:

- Visualización en tiempo real: el uso de software de diseño como TouchDesigner, combinado con Ableton Live para la producción sonora, permite crear representaciones visuales en tiempo real a partir del audio. Esta línea de trabajo abriría la posibilidad de diseñar con el sonido de manera directa, haciendo que la forma sea una frecuencia inmediata a la frecuencia.
- Interfaz sonido-forma: esta línea también plantea la posibilidad de desarrollar herramientas propias que traduzcan la señal del audio en geometrías controladas.

4) Expansión a otros fenómenos:

- Diseño desde patrones naturales: así cómo las ondas sonoras han sido empleadas cómo principio generativo en este trabajo, otros fenómenos del mundo físico pueden convertirse en detonantes formales. Entre ellos se podría explorar procesos cómo la morfogénesis o los patrones de crecimiento fractal en organismos vivos.
- Material Ecology: siguiendo las líneas de investigación desarrolladas por Neri Oxman, el diseño puede nutrirse de sistemas naturales complejos que integren forma, función y materialidad en un solo gesto.



Figura 60. Visualización 2 de posible resultado de la instalación de los paneles acústicos.
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

Ableton. (2023, February 7). *Visualizing Sound: A Beginner's Guide to Using TouchDesigner with Live* | Ableton. Wwww.ableton.com. <https://www.ableton.com/en/blog/visualizing-sound-a-beginners-guide-to-using-touchdesigner-with-live/>

Aimée. (2023). *What shows that PET felt has good acoustic value?* | EASYfelt. Easyfelt.co.uk. <https://www.easyfelt.co.uk/blogs/what-shows-that-pet-felt-has-good-acoustic-value>

Aouf, R. S. (2019, September 12). 3D printing meets felt in new additive manufacturing technique. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2019/09/12/robotic-needle-felting-taubman-college-design/>

Autodesk. (2023, October 18). *Stereolithography (SLA)* | Additive Manufacturing . Autodesk.com. <https://www.autodesk.com/solutions/stereolithography>

BAUX. (2021). *THE BOOK OF ACOUSTICS: Making people happy at work*. Vulkan.

Blender. (2025, May 10). *Geometry Nodes — Blender 4.4 Manual*. Blender.org. https://docs.blender.org/manual/en/latest/modeling/geometry_nodes/index.html

Chladni, E. F. F. (2015). *Treatise on Acoustics* (R. T. Beyer, Trans.). Springer.

International Commission for Acoustics. (2017). *Acoustics throughout History* . Sound2020.org. <https://www.sound2020.org/acoustics/history/>

MUMU DESIGN. (2024, December 2). *Does The Shape Of Acoustic Foam Matter?* Mumu-Ing.com; Dongguan MUMU Woodwork Co., Ltd. <https://www.mumu-ing.com/news/does-the-shape-of-acoustic-foam-matter-82926042.html>

Ponce Campuzano, J. C. (2025, July 6). *Chladni Patterns*. Dynamic Mathematics. <https://www.dynamicmath.xyz/chladni-patterns/>

Rees, T. (2018, October 23). *Ernst Chladni: Physicist, Musician and Musical Instrument Maker*. Wwww.whipplemuseum.cam.ac.uk; University of Cambridge. <https://www.whipplemuseum.cam.ac.uk/explore-ripple-collections/acoustics/ernst-chladni-physicist-musician-and-musical-instrument-maker>

Rossing, T. D. (2014). A Brief History of Acoustics. In *Springer Handbook of Acoustics* (pp. 11–27). Springer Nature Link.

Stevens Curl, J., & Wilson, S. (2015). Parametric Design. In *The Oxford Dictionary of Architecture*. Oxford University Press.

Ullman, D. (2007). Life and work of E.F.F. Chladni. *The European Physical Journal Special Topics*, 145, 25–32.

Van Kamp, I., & Woudenberg, F. (2024). *A Sound Approach to Noise and Health*. Springer Nature Link.

Walter, N., & Gürsoy, B. (2022, July 22). A Study on the Sound Absorption Properties of Mycelium-Based Composites Cultivated on Waste Paper-Based Substrates. *Biomimetics*, 7, 100.

REFERENCIA DE FIGURAS

Acoustic Tile in the interior of National Academy of Sciences Washington, DC. (1924). [Fotografía]. In International Hildreth Meière Association. <https://www.hildrethmeiere.org/files/images/hildreth-meiere-national-academy-of-sciences-interior-great-hall.jpg>

Aouf, R. S. (2019a). Acoustic panel with robotic needle felting [Fotografía]. In Dezeen. https://static.dezeen.com/uploads/2019/09/Robotic-needle-felting_dezeen_2364_col_11-1704x1136.jpg

Aouf, R. S. (2019b). Robotic Needle Felting [Fotografía]. In Dezeen. https://static.dezeen.com/uploads/2019/09/Robotic-needle-felting_dezeen_2364_col_5-1704x959.jpg

Arturel. (2025). Sample box of acoustic panels [Fotografía]. In Arturel. https://arturel.es/cdn/shop/files/WEB_ARTUREL_SAMPLEBOX_7_Cropped.jpg?v=1730190306&width=600

ASI Architectural. (2022). The Theater at Epidaurus – An Ancient Marvel of Acoustic Design [Fotografía]. In ASI Architectural. https://www.asiarchitectural.com/wp-content/uploads/2022/06/christos-sakellaridis-W_Nu5qW8WVg-unsplash.jpeg

Baudry, G. (1635). Marin Mersenne : Harmonicorum Libri In Quibus Agitur De Sonorum Natura, Causis & effectibus [Fotografía]. In J & J Lubrano Music Antiquarians. <https://lubranomusic.cdn.bibliopolis.com/pictures/39451b.jpeg?auto=webp&v=1695577323>

Bettmann. (1920). Thomas Edison listening to a phonograph [Fotografía]. In Britannica. <https://cdn.britannica.com/07/75507-050-80CACB40/Thomas-Edison-phonograph.jpg>

Blast Studio. (2024). Tree Column 3D-printed from mushroom [Fotografía]. In Parametric Architecture. https://parametric-architecture.com/wp-content/uploads/2022/09/Blast-Studio_5.jpg

Channarongsds. (2020). Grabado antiguo de papelería [Ilustración]. In *iStockPhoto*. <https://media.istockphoto.com/id/1213627189/es/vector/ilustraci%C3%B3n-de-grabado-antiguo-de-papeler%C3%ADa-conjunto-dibujo-en-estilo-vintage-clip-art-en.jpg?s=612x612&w=0&k=20&c=hQV1QmpDTYiGUi59Ho9E0vxcUrAU888buVOMc3GjBFU=>

Chieng, W. (2015). The traditional Chinese pentatonic modes definition [Partitura]. In *ResearchGate*. <https://www.researchgate.net/profile/Wei-Hua-Chieng/publication/282545186/figure/fig7/AS:668779847626765@1536460949615/The-traditional-Chinese-pentatonic-modes-definition.png>

CLAUDE. (2021). Ableton & TouchDesigner: How to Build Audiovisual Live Set [Fotografía]. In *glitch.cool*. <https://www.glitch.cool/claude/ableton-and-touchdesigner-how-to-build-audiovisual-live-set>

Creality. (2025). Impresora 3D [Fotografía]. In *MedicalExpo*. https://img.medicaexpo.es/images_me/photo-mg/299681-16686891.jpg

de Gheyn, J. (2012). Pierre Gasendi Experimento [Ilustración]. In *Indiana Public Media*. <https://indianapublicmedia.org/amomentofscience/measuring-the-speed-of-sound/>

Edith and Peter O'Donnell Awards. (2021). Cerebro [Ilustración]. In *Pinterest*. <https://i.pinimg.com/1200x/94/36/35/943635adc4e9e72592827286f47034ff.jpg>

Fernández, T., & Tamaro, E. (n.d.). Al-Biruni [Ilustración]. In *Biografías y Vidas*. <https://www.biografiasyvidas.com/biografia/b/fotos/biruni.jpg>

Handy, L. C. (2017). Edison con su primer fonógrafo [Fotografía]. In *Cienciaplus*. https://img.europapress.es/fotoweb/fotonoticia_20171121112726_1200.jpg

Hugo, V. (1913). Le Sacre du printemps de Stravinski [Partitura]. In *Pinterest*. <https://i.pinimg.com/1200x/2f/b5/1d/2fb51da522481a55215bad58e59d742f.jpg>

iStock. (2022). La vida de los habitantes de las cuevas [Ilustración]. In *iStock*. https://media.istockphoto.com/id/1389902531/vector/the-life-of-the-cave-dwellers.jpg?s=612x612&w=0&k=20&c=iVvyvdO8oomvwrsAKkE_70WYeJoy3E0vYccQCyGfz9o=

Joseph Sauver. (1716). [Ilustración]. In *WikiCommons*. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/61/Tournefort_Joseph_Pitton_de_1656-1708.jpg/330px-Tournefort_Joseph_Pitton_de_1656-1708.jpg

Midwestgrowkits. (2024). Micelio [Fotografía]. In *Parametric Architecture*. <https://parametric-architecture.com/wp-content/uploads/2024/07/mushroom-indoor-copy.webp>

Mili, G. (1945). Manos del director de orquesta Efrem Kurtz mientras dirigía [Fotografía estroboscópica]. In *Pinterest*. <https://i.pinimg.com/1200x/fb/92/ac/fb92acc2ff-2b16946bd26e1fb46d66d5.jpg>

Mogu. (2025). Instalación de paneles Mogu Fields [Fotografía]. In *Mogu*. https://mogu.bio/wp-content/uploads/2021/10/Mogu_Acoustic_Fields_Hires-1.jpg

Mohseni, A., Rocha Vieira, F., Pecchia, J. A., & Gürsoy, B. (2023). Representación esquemática del micelio [Ilustración]. In *Biomimetics*. https://www.mdpi.com/biomimetics/biomimetics-08-00257/article_deploy/html/images/biomimetics-08-00257-g001-550.jpg

Nales, R. (1787). Chladni Experiment [Ilustración]. In *IDIS*. https://proyectoidis.org/wp-content/uploads/2014/11/Bowing_chladni_plate.png

NASA. (1972). Dos trabajadoras de la NASA en una cámara anecoica o de absorción de sonido [Fotografía]. In *NASA Sound Chamber*. https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/03/144560main_image_feature_527_ys_full.jpg

Nastasic. (2018). Llamada de teléfono antiguo [Ilustración]. In *iStockPhoto*. <https://www.istockphoto.com/es/vector/hacer-una-llamada-de-tel%C3%A9fono-antiguo-gm965380630-263458861>

NSA Digital Archive. (2009). Corazón Aislado [Ilustración]. In *iStockPhoto*. <https://i.pinimg.com/736x/56/69/6f/56696f6b9a758bb39a8420b9d93b76f7.jpg>

Pressbooks. (1873). Robert Hooke: Savart Wheel diagram [Ilustración]. In *Popular Science Monthly* Volume 3, p.8. https://pressbooks.pub/app/uploads/sites/140/2017/12/PSM_V03_D018_Savart_apparatus-1536x1027.jpg

Samuel Cabot Inc. (1928). Cabot's quilt [Fotografía]. In *Internet Archive*. <https://archive.org/details/BuildWarmHousesWithCabotsQuilt/page/n7/mode/2up?view=theater>

Sanzio, R. (1512a). Aristoteles - Escuela de Atenas [Fresco]. In *WikiCommons*. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e3/Raffael_061.jpg/960px-Raffael_061.jpg?20050521025826

Sanzio, R. (1512b). Pitágoras - Escuela de Atenas [Fresco]. In *WikiCommons*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cropped_image_of_Pythagoras_from_Raphael%27s_School_of_Athens.jpg

Sustermans, J. (1637). Galileo [Óleo]. In *Britannica: Uffizi Gallery*. <https://cdn.britannica.com/29/18829-050-3F57E4F8/Galileo-Justus-Sustermans-Uffizi-Gallery-Florence-1637.jpg>

Viriditas. (2006). Boston Symphony Hall with interior acoustically designed by Wallace Clement Sabine [Fotografía]. In *WikiCommons*. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/Symphony_hall_boston.jpg?20060717025636

Vitruvio. (n.d.). De Architectura [Ilustración]. In *ArquInsights*. <m/wp-content/uploads/2023/09/0015-0015-2-de-architectura.jpg>