

## **Instituto Universitario para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones**



### **Trabajo Fin de Máster**

## **Visualización del Sonido. Representación de las frecuencias sonoras en el espectro visible.**

Autor: Andrea Victoria Báez Hernández

Tutores: José A. Rabadán Borges  
Víctor Guerra Yánez

Fecha: Enero 2017



# Instituto Universitario para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones

## Hoja de Firmas del TFM



## Visualización del Sonido. Representación de las frecuencias sonoras en el espectro visible.

**Autor:**

Fdo.: Andrea Victoria Báez Hernández

**Tutores:**

Fdo.: José A. Rabadán Borges

Fdo.: Víctor Guerra Yáñez

**Fecha: Enero 2017**



# Instituto Universitario para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones

## Hoja de Evaluación del TFM



## Visualización del Sonido. Representación de las frecuencias sonoras en el espectro visible.

Calificación: .....

Presidente

Secretario

Vocal

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.:

Fecha: Enero 2017



## Índice

Índice de Figuras .....	8
Índice de Tablas.....	10
CAPITULO 1. Introducción .....	12
1.1 Antecedentes .....	13
1.2 Novedad de la propuesta .....	16
1.3 Objetivos .....	16
1.4 Estructura de la memoria.....	17
CAPITULO 2. Conceptos Teóricos Básicos .....	20
2.1. La Luz y la percepción visual.....	20
2.2. El sonido y la percepción acústica .....	23
CAPITULO 3. Conversión Acusto-óptica .....	26
3.1 Análisis y representación de estudios previos.....	26
3.2 Conversión de frecuencias a longitud de onda y viceversa.....	28
3.3 Método Propuesto: Conversión basada en la Fisiología .....	29
3.3.1 Función de eficiencia luminosa espectral.....	30
3.3.2 Ponderación normalizada A .....	31
3.3.3 Ecuación de Conversión Fisiológica.....	32
3.3.3 CIE 1931 XYZ-RGB.....	33
3.4 Particularización para la ejecución y escucha musical. ....	34
CAPITULO 4. Metodología.....	36
4.1 Generación de la base de datos .....	36
4.2 Pre-procesado de las señales de audio .....	38
4.3 Técnicas de representación visual.....	40
CAPITULO 5. Resultados.....	42
5.1 Relación fisiológica y su particularización. ....	42
5.2 Representación de una nota simple.....	46
5.3 Representación de un acorde .....	50
5.4 Representación de una canción .....	51

---

5.5	Resultados de la particularización escalar.....	52
CAPITULO 6. Conclusiones y Líneas Futuras.....		54
6.1	Prueba Psicológica de aplicación Pedagógica y Artística.....	54
Bibliografía .....		55
Anexo 1 .....		56
Anexo 2 .....		57
Anexo 3 .....		58
Anexo 4 .....		59
Anexo 5 .....		60
Anexo 6 .....		61
Anexo 7 .....		62
Anexo 8 .....		63
Anexo 9 .....		65
Anexo 10 .....		66

## Índice de Figuras

Ilustración 1. Relación Color-Sonido, Isaac Newton.....	14
Ilustración 2. Espectro Electromagnético.....	20
Ilustración 3. Correspondencias del espectro visible .....	21
Ilustración 4. Curva de Sensibilidad de la vista. ....	21
Ilustración 5. Estructura interna del ojo.....	22
Ilustración 6. Estructura interna del oído.....	23
Ilustración 7. Curvas de niveles de presión.....	24
Ilustración 8. Resultados de Darcey y Jeffrey. El sonido del Color.....	27
Ilustración 9. Resultados Pérez y Gilabert. Círculo Cromático Tonal-musical.....	27
Ilustración 10. Relación Lineal Ascendente.....	28
Ilustración 11. Relación Lineal Descendente.....	29
Ilustración 12. Esquema funcional .....	29
Ilustración 13. Función de eficiencia luminosa espectral.....	30
Ilustración 14. Fórmula de Ponderación A (A weighting).....	31
Ilustración 15. Código de la Ponderación A en Matlab.....	31
Ilustración 16. Curva de Ponderación A.....	31
Ilustración 17. Ecuación de Conversión Fisiológica.....	32
Ilustración 18. Código de la Ecuación de Conversión Fisiológica en Matlab.....	33
Ilustración 19. CIE 1931 XYZ.....	33
Ilustración 20. Colores de los 88 sonidos del piano.....	34
Ilustración 21. Compresión de la Ecuación de Conversión Fisiológica.....	34
Ilustración 22. Correspondencia del teclado con las notas en clave de Fa.....	37
Ilustración 23. Grabación y edición de audio en Logic Pro X.....	38
Ilustración 24. Transformada de Fourier.....	39
Ilustración 25. Procesado de la señal de audio.....	39
Ilustración 26. C3.261.626Hz Tabla 3.....	45
Ilustración 27. C3.261.626Hz. Tabla 4.....	45
Ilustración 28. As.27.5Hz.....	46
Ilustración 29. A0.55Hz.....	46
Ilustración 30. A1.110Hz.....	46

Ilustración 31. A2.220Hz. ....	47
Ilustración 32. A3.440Hz. ....	47
Ilustración 33. A4.880Hz. ....	47
Ilustración 34. A5.1760Hz. ....	47
Ilustración 35. A6.3520Hz. ....	47
Ilustración 36. FFT sonido A3 piano wav. ....	48
Ilustración 37. Nota A3 piano .wav segundo 00:00. ....	48
Ilustración 38. Nota A3 piano .wav segundo 00:02. ....	48
Ilustración 39. Nota A3 piano .wav segundo 00:04. ....	49
Ilustración 40. Nota A3 piano .wav segundo 00:05. ....	49
Ilustración 41. Nota A3 piano .wav segundo 00:07. ....	49
Ilustración 42. Ruido Blanco. ....	50
Ilustración 43. Acorde de C (do mayor) sonido piano .wav. ....	50
Ilustración 44. Acorde de C (do mayor ) abierto en frecuencias. ....	50
Ilustración 45. Fragmento de "La Primavera" de Vivaldi. Segundo 00:00. ....	51
Ilustración 46. Fragmento de "La Primavera" de Vivaldi. Segundo 00:13. ....	51
Ilustración 47. Fragmento de "La Primavera" de Vivaldi. Segundo 00:33. ....	51
Ilustración 48. Fragmento de "La Primavera" de Vivaldi. Segundo 00:37. ....	51
Ilustración 49. Asignación de color a cada nota de la escala por compresión de código. ....	52

## Índice de Tablas

Tabla 1. Relación de Isaac Newton.....	14
Tabla 2. Escalas de color (antecedentes) .....	15
Tabla 3. Resultados de la propuesta fisiológica. ....	43
Tabla 4. Resultados de la particularización de la ecuación de conversión fisiológica. ....	44



# CAPITULO 1

---

## Introducción

“La percepción es la manera en la que el cerebro de un organismo interpreta los estímulos sensoriales que recibe a través de los sentidos para formar una impresión consciente de la realidad física de su entorno ([1]Sinclair, 1998)”.

La interpretación de los estímulos sensoriales es un proceso complejo que a lo largo de la historia, no solo la ciencia, la psicología y la medicina han tratado de explicar, también filósofos, matemáticos, pintores y músicos han desarrollado teorías que establecen una relación entre los sentidos.

¿Podemos ver el sonido? ¿Podemos escuchar los colores?

Este proyecto establece una relación entre el color y el sonido, como resultado tanto de las características físicas del entorno como de la respuesta fisiológica de nuestro organismo, con el fin de desarrollar una herramienta que permita servir de apoyo a las personas con discapacidad auditiva en el proceso de la comprensión de la música y el sonido. Esta propuesta, basada en la representación de colores, constituye también una base pedagógica en el campo de la enseñanza musical además de una herramienta creativa para la representación visual de espectáculos musicales.

Para todo ello se lleva a cabo una representación de las frecuencias sonoras en el espectro visible, analizando la correspondencia física entre la frecuencia ( $f$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) partiendo del punto de mayor sensibilidad tanto acústica como visual en la fisiología de la vista y el oído.

## 1.1 Antecedentes

Durante los últimos 300 años se han realizado estudios que establecen una relación, ya sea psicológica, física, pedagógica o artística entre el color y el sonido.

A lo largo de la historia, el arte ha intentado plasmar las mismas emociones y conocimientos en distintos ámbitos creativos. Así, al igual que en la antigüedad muchas obras musicales clásicas se han reflejado en la pintura, en la actualidad, los avances tecnológicos han desarrollado el espectáculo visual a través de la representación de colores, ritmos y formas, ambientando música y teatro, con el fin de apoyar lo que se pretende transmitir.

La relación entre colores y sonidos se ha estudiado mayoritariamente a través de experimentos sociales. Y estos han dado lugar a métodos aplicados a la enseñanza y a la psicología. Dentro del campo de la enseñanza encontramos a autores como la compositora chilena Estela Cabezas, que durante los años 60' desarrolló un método llamado "música en colores", asignando un color a cada nota musical con fines pedagógicos. En el campo de la psicología encontramos el concepto de Arkegrama, que constituye un modelo de correspondencia universal, un instrumento para hallar las correspondencias exactas entre distintos niveles de realidad: notas musicales, sonidos articulados (fonemas), imágenes, formas, colores y símbolos.

A continuación se presentan algunos autores destacables en el estudio de la asociación acusto-óptica, como son Aristóteles, Newton, Munsell, Castel, Wallace, Scriabin, entre otros.

"Los comienzos de la relación entre música e imagen datan de los tiempos de Aristóteles y Pitágoras con sus armonías de color y sonido y sus correspondencias entre olores y colores. Mucho más tarde, Atanasius Kircher, Leonardo Schüller, Bernardo Luini, Giuseppe Arcimboldo o el gran músico místico ruso Frederick Kartner fantasearon con este tema durante los siglos XVIII y XIX y dieron lugar a experiencias variadas de unión musicovisual."  
([2]Valdellós, 2007)

El principal propulsor en el estudio de esta materia es el científico Isaac Newton (1704). En su “Tratado de las reflexiones, refracciones, inflexiones y colores de la luz”[3] (Opticks), Newton descubre que al dejar pasar luz blanca a través de un prisma se genera un espectro de color y relaciona la secuencia ordenada de estos siete colores con las siete notas de la escala musical.

Isaac Newton	
NOTAS	COLORES
C (do)	Violet
D (re)	Red
E (mi)	Orange
F (fa)	Yellow
G (sol)	Green
A (la)	Blue
B (si)	Indigo

Tabla 1. Relación de Isaac Newton.

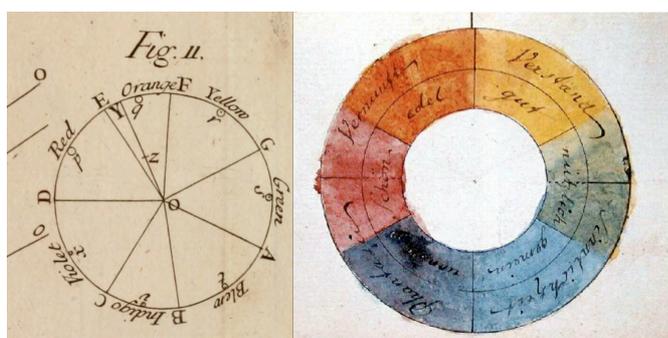


Ilustración 1. Relación Color-Sonido, Isaac Newton.

Louis Bertrand Castel, reconocido como uno de los más eminentes matemáticos de su tiempo, publica en 1720 “la Musique en Couleurs” primero de sus escritos sobre música y color. Castel utilizó la serie de colores ROYGBIV empleados por Newton, haciendo coincidir la nota C con el color azul cian y asignando los colores a semitonos precisos.

Alexander Wallace Rimington desarrolló y patentó su órgano de color en 1894, el cual presentó en New York en 1895. Wallace asignó proporcionalmente la franja de luz visible entre la primera y la última nota de una octava.

Albert Munsell elabora su modelo de color basado en tres variables: tono, saturación y valor tomando como referencia la música, en la que cada sonido queda definido por su “altura, intensidad y duración”.

“La comparación de la pintura y la música y su consecuencia, la oposición analógica dibujo-melodía y color-armonía, está relacionada con la teoría de la imitación. [...] Rousseau insistirá en esta comparación en el Examen de dos principios expuestos por el señor Rameau y la desarrollará considerablemente en el Ensayo sobre el origen de las lenguas. La analogía de la pintura y de la música, del ojo y del oído, de los colores y de los sonidos, fue frecuentemente afirmada en el siglo XVII (Kircher, Mersenne) y sobre todo en el XVIII (Du

Bos, Batteaux, Diderot, Serre, Rameau, etc). Fue el origen del “clavecín ocular” del padre Castel (Le Mercure de France, noviembre de 1725)”. ([4]Rousseau, 2011)

“La contribución más conocida a la síntesis de sonidos, idioma, movimiento y juego de colores es la de Alexander Nikolejewitsch Schriabin (1871-1915), con su Prometheus: Le poème du feu (1910), obra que recuerda a la obra de Haendel Feuerwerksmusik de 1749, una partitura completa para luces en la que cada nota tenía asociada un color específico. En el Poème du feu de Prometheus, con la ayuda de una notación especial, Schriabin sumerge la sala en un juego de luces y su tabla Farbegehors contiene por otro lado instrucciones sobre algunos colores ligados a determinados tonos. En Prometheus aparece un sistema de tonos tan absolutamente innovador que es, incluso, difícil hablar de síntesis de tonos y colores. Muchos pintores y escritores volvieron sobre esta obra. El pintor inglés Wallace Rimington representó el Prometheus con ayuda de sus proyectores de color, creando una variante del órgano de colores, además de escribir un libro teórico llamado Farbmusik (Música de colores) en 1912. ([2]Valdellós, 2007)

El estudio por parte de estos y otros autores impulsa el desarrollo de este proyecto. En la tabla extraída de (Glimpse) que se presenta a continuación se pueden observar las distintas propuestas de color para las notas de la escala musical de varios autores.

		C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
Isaac Newton	1704												
Louis Bertrand Castel	1734												
George Field	1816												
D. D. Jameson	1844												
H. von Helmholtz	1867												
Theodor Seemann	1881												
A. Wallace Rimington	1893												
Bainbridge Bishop	1893												
Alexander Scriabin	1911												
Adrian Bernard Klein	1930												
August Aeppli	1940												
I. J. Belmont	1944												
Steve Zieverink	2004												

Tabla 2. Escalas de color (antecedentes)

## 1.2 Novedad de la propuesta

La correspondencia entre la longitud de onda y la frecuencia a partir de la respuesta fisiológica aporta un nuevo enfoque científico que permite establecer la relación que existe entre los sentidos de la vista y la audición a la hora de interpretar el color y el sonido.

A partir de la curva de respuesta tanto del órgano de la vista como del oído se obtienen los parámetros de mayor sensibilidad. Estas curvas parten de fórmulas matemáticas aplicadas a la respuesta fisiológica. La ley de ponderación A para el oído y la CIE 1931 para la vista. Asociando los colores a los que el ojo humano es más sensible con los sonidos a los que mejor responde el oído humano se obtiene el modelo de esta propuesta.

El desarrollo de la interfaz que se lleva a cabo siguiendo este nuevo enfoque científico, se convierte en una herramienta útil y novedosa que fundamenta el uso de los colores del sonido en ámbitos clave como el apoyo visual para personas con discapacidad auditiva, recursos pedagógicos y elementos de diseño artístico en espectáculos.

## 1.3 Objetivos

El propósito central de este proyecto consiste en representar la música a través de los colores en base a la relación que existe entre los sentidos y la respuesta fisiológica que argumenta su correspondencia física.

A continuación se detallan los objetivos parciales fijados con el fin de alcanzar el objetivo final:

1. Estudiar la relación y transformación entre frecuencias y longitudes de onda desde un punto de vista fisiológico.
2. Desarrollar una interfaz como base de representación de los resultados.
3. Representar la música a través de los colores.
4. Explorar las diferentes opciones de representación musical.

## 1.4 Estructura de la memoria

La memoria queda estructurada de acuerdo al artículo 3 del Reglamento de Trabajo Fin de Máster del Instituto Universitario para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones. Siguiendo dicho artículo, la memoria cuenta con 6 capítulos y 2 anexos, a lo que se añade la bibliografía utilizada. A continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de ellos:

- **Capítulo 1.** Introducción.  
En el primer capítulo se presentan los antecedentes en el estudio de esta materia, así como los objetivos que se plantean y la novedad de la propuesta.
- **Capítulo 2.** Conceptos teóricos básicos.  
Introducción teórica sobre los conceptos de la luz, la percepción visual, el sonido y la percepción acústica como base para la comprensión del resto de la propuesta.
- **Capítulo 3.** Conversión acusto-óptica.  
En este apartado se presentan los modelos propuestos en los que se fundamenta este proyecto. Se analizan los estudios previos y se lleva a cabo una conversión de las características acústicas al dominio visual, inicialmente de forma matemática lineal y posteriormente en el aspecto fisiológico.
- **Capítulo 4.** Metodología.  
Se presenta la base de datos, el tratamiento de la señal, la conversión fisiológica, la transformación  $(x,y,z)$  a  $(R,G,B)$  y el diseño de la matriz que actúa como interfaz.
- **Capítulo 5.** Resultados.  
Se presentan las diferentes pruebas que se han llevado a cabo y el análisis de los resultados obtenidos. Basándose en los recursos de representación de Matlab, se reproduce una secuencia musical en forma visual.

- **Capítulo 6.** Conclusiones y Líneas Futuras.

En este capítulo se muestra una comparativa entre los resultados de este trabajo y los mostrados en los antecedentes. Se detallan las conclusiones a las que se ha llegado con el desarrollo del trabajo, así como se plantean líneas futuras de investigación.



## CAPITULO 2

### Conceptos Teóricos Básicos

El enfoque psicofísico consiste en determinar la relación entre los estímulos del entorno y la percepción. Este enfoque ha medido las características de funcionamiento básico de la percepción, cosa que implica determinar umbrales de cualidades asociadas a cada sentido (por ejemplo, la detección de luz, movimiento, sonido, sabor, olor y estímulos). El enfoque fisiológico se refiere a la determinación de los mecanismos biológicos responsables de los receptores sensibles a los tipos específicos de estímulos (luz para la visión, el sonido de la audición, etc.) ([5]Goldstein, 2010).

#### 2.1. La Luz y la percepción visual

La parte del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir se denomina espectro visible (luz visible). La luz visible está compuesta por radiaciones de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm. La sensibilidad del ojo humano depende de la longitud de onda y tiene un máximo en 550 nm. Algunas personas son capaces de percibir desde 380 hasta 780 nm. [6] (Plataforma e-ducativa aragonesa)

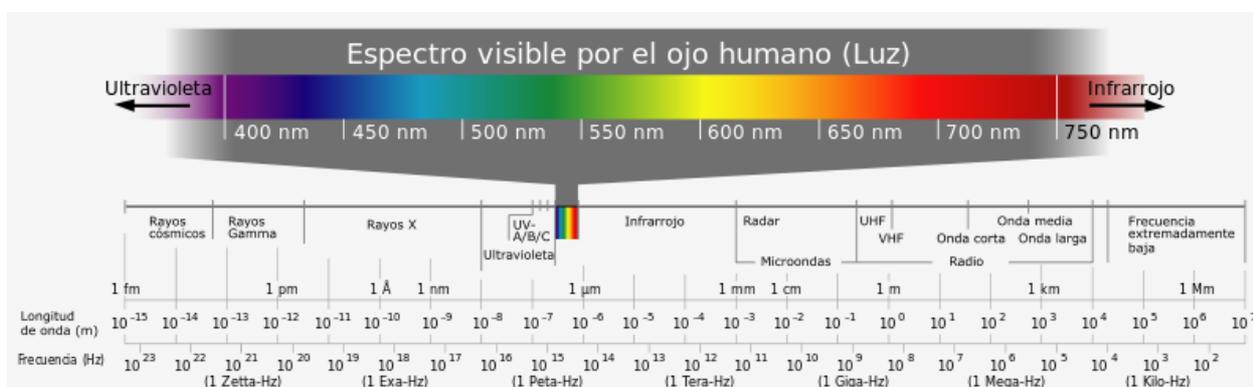


Ilustración 2. Espectro Electromagnético.

Luz visible		
Color	Frecuencia	Longitud de onda
Violeta	668–789 THz	380–450 nm
Azul	631–668 THz	450–475 nm
Ciano	606–630 THz	476–495 nm
Verde	526–606 THz	495–570 nm
Amarillo	508–526 THz	570–590 nm
Naranja	484–508 THz	590–620 nm
Rojo	400–484 THz	620–750 nm

Ilustración 3. Correspondencias del espectro visible

Rango visible al ser humano: La parte visible del espectro al ser humano va de 400 a 700. Sin embargo podemos apreciar los colores del círculo cromático: violeta, azul, verde, verde - amarillo, amarillo, amarillo-rojo y rojo. En la Ilustración 4 se observa el valor de la frecuencia y la longitud de onda para cada uno; los colores usualmente se expresan en rangos de frecuencia, no es posible asignar un valor específico para cada uno, ya que su tonalidad va cambiando de acuerdo a la forma como se observe de derecha a izquierda o al contrario.

En la curva de sensibilidad de la ilustración 5 se nota como los seres humanos presentamos la mayor sensibilidad al color amarillo, en los 550 nm.

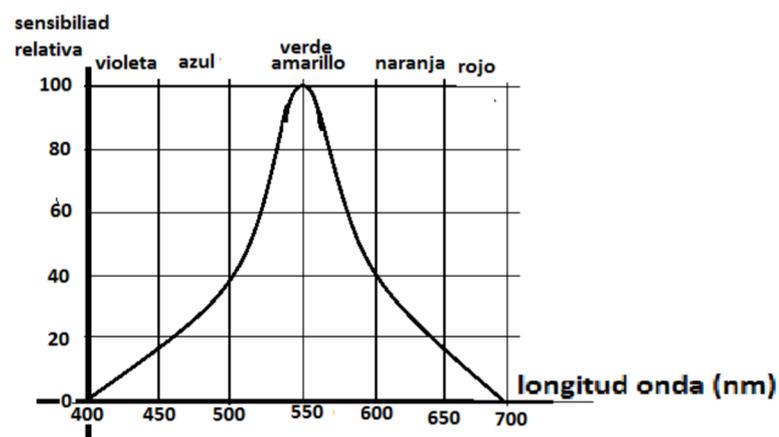


Ilustración 4. Curva de Sensibilidad de la vista.

Tal y como refiere J.A. Taboada en su libro titulado “Manual de Luminotecnia”:

El ojo es el órgano fisiológico mediante el cual se experimentan las sensaciones de luz y color. El ojo recibe la energía luminosa y la transforma en energía nerviosa, que es conducida a través del nervio óptico hasta el cerebro.

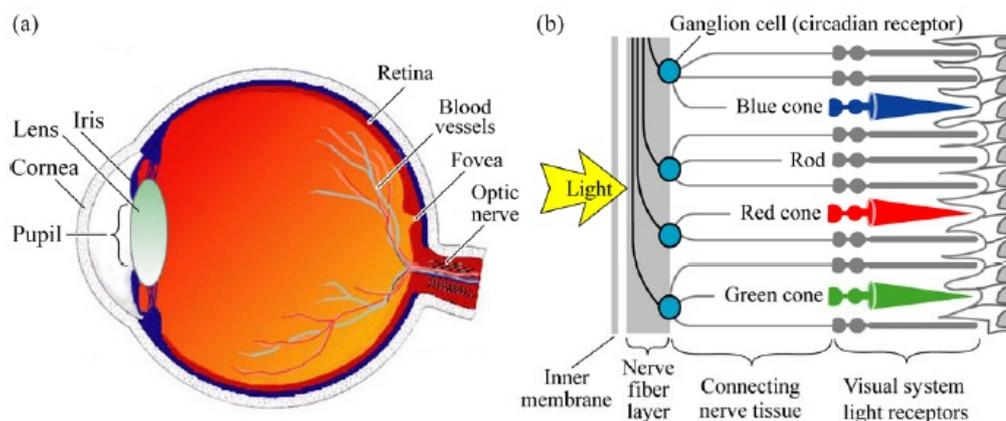


Fig. 16.1. (a) Cross section through a human eye. (b) Schematic view of the retina including rod and cone light receptors (adapted from Encyclopedia Britannica, 1994).

*Ilustración 5. Estructura interna del ojo.*

En la ilustración 5, se representa un corte longitudinal esquemático del ojo humano, en el que se puede apreciar su constitución anatómica. El ojo se puede comparar con una cámara fotográfica, aunque es mucho más perfecto que ésta y presenta algunas diferencias fundamentales con respecto a ella. El “objetivo” en el ojo está compuesto por la córnea, el humor acuoso y el cristalino; el “diafragma” es el iris, y la “película fotosensible”, la retina. ([6]Taboada, 1979)

La retina está dotada de elementos foto-receptores que cumplen distintas funciones. Estos elementos, por su forma, reciben el nombre de conos y bastoncillos. Los conos y los bastoncillos son los órganos realmente sensibles a los estímulos luminosos, siendo en ellos donde se realiza la transformación de la energía luminosa en sensación o energía nerviosa. Los bastoncillos son muy sensibles a la luz y casi insensibles al color, mientras que los conos son muy sensibles a los colores y casi insensibles a la luz. De aquí que la misión de los bastoncillos sea la de percibir la mayor o menor claridad con que están iluminados los objetos, y la de los conos el apreciar los colores de éstos. ([6]Taboada, 1979)

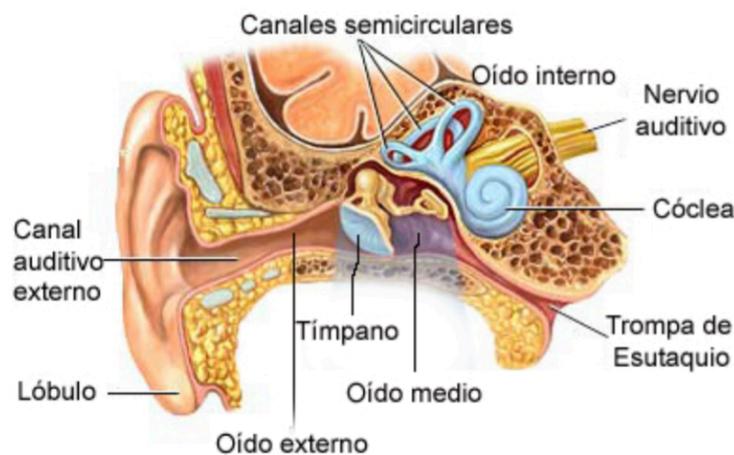
En la visión a la luz del día o con suficiente luz artificial clara (llamada visión fotópica) intervienen los bastoncillos y los conos, mientras que en la visión nocturna o con muy poca luz (llamada visión escotópica) no se distingue el color de los objetos, lo que justifica el refrán de que "de noche todos los gatos son pardos". ([6]Taboada, 1979)

## 2.2. El sonido y la percepción acústica

El departamento de ingeniería de Comunicaciones de la universidad de Cantabria explica lo siguiente:

"El oído humano es un órgano sensorial que realiza dos funciones sumamente importantes:

- Actúa como transductor, convirtiendo la energía sonora en señales eléctricas que luego son transportadas al cerebro para su procesamiento, interpretación y almacenamiento.
- Es el órgano primario del equilibrio y desempeña un papel muy importante en la sensación subjetiva del movimiento y la orientación espacial.



*Ilustración 6. Estructura interna del oído.*

El sistema auditivo humano está capacitado para escuchar sonidos de frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20000Hz.

No todas las frecuencias son percibidas con la misma intensidad, siendo el oído humano más sensible en la banda comprendida entre los 500 y 6.000 Hz. Es decir, como se comprueba en las curvas de audición de la Ilustración 7, el oído humano se comporta “algo sordo” en bajas y altas frecuencias.

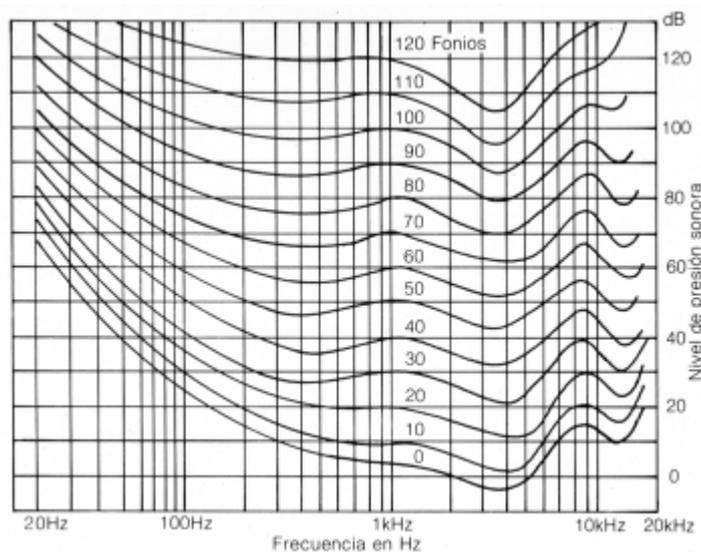


Ilustración 7. Curvas de niveles de presión.

La banda de frecuencias en la que fluctúa la voz humana está comprendida entre los 500 y los 2.000 Hz.



## CAPITULO 3

---

### Conversión Acusto-óptica

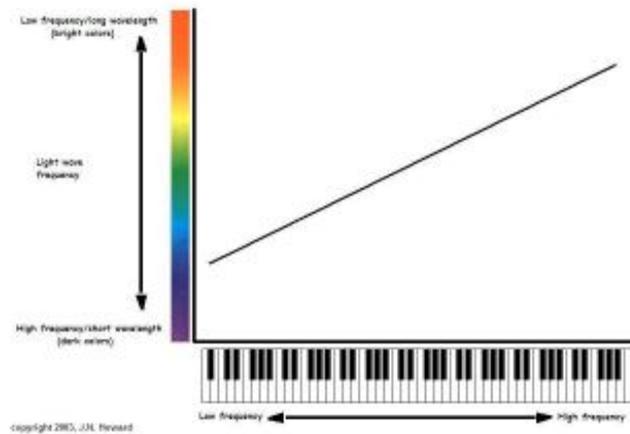
En el apartado que se detalla a continuación se trataran las diferentes relaciones entre la frecuencia y la longitud de onda. Para llevar a cabo las pruebas oportunas, tanto de cálculo como de representación, se ha utilizado el programa Matlab (Herramienta de software matemático con un entorno de desarrollo integrado y lenguaje de programación propio).

#### 3.1 Análisis y representación de estudios previos

Tal y como se relató en los antecedentes, a lo largo del tiempo varios autores han establecido una relación sonido-color. Para este proyecto se han seleccionado los dos últimos trabajos de investigación llevados a cabo en términos de esta materia.

Fundamentados en el aspecto psicológico, Darcee L. Datteri y Jeffrey N. Howard (Wichita State University)[7] (2004) expusieron un artículo sobre “El sonido del Color” en el año 2004. Seleccionaron a setenta y un participantes, a los que se les presentó una serie de tonos junto a 7 cajas de colores con el fin de investigar los procesos auditivos y la información sensorial. Los participantes relacionaron tono y color en función de que les parecía que encajaba mejor. Los resultados demostraron que existía una relación inversa en el procesamiento sensorial audiovisual entre la longitud de onda y la frecuencia de luz frente a la longitud de onda y la frecuencia del sonido. Los análisis indicaron un patrón de datos simétrico que revela una relación cuasi-lineal entre el tono y el color, sugiriendo así un algoritmo en el proceso neurológico universal en la relación audio-visio-sensorial.

**Figure 7.** Theorized inverse relationship between wavelength frequency of light and wavelength frequency of sound for single tone presentations



*Ilustración 8. Resultados de Darcey y Jeffrey. El sonido del Color.*

Por otro lado, y fundamentados en el aspecto matemático, Joaquín Pérez y Eduardo J. Gilabert (Departamento de Ing. Gráfica de la Universidad Politécnica de Valencia)[8] (2010) expusieron un artículo en el año 2010 titulado “Color y música: Relaciones físicas entre tonos de color y notas musicales”. En dicho estudio se presenta una relación matemática simple que relaciona el tono de color con la nota musical correspondiente. La metodología que llevaron a cabo consistió en la comparación de la dimensión tono de color con la dimensión altura de sonido utilizando toda la franja de valores del espectro de luz visible frente a toda la franja de sonido musical audible.

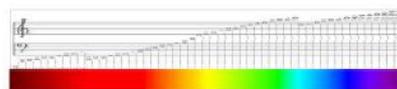
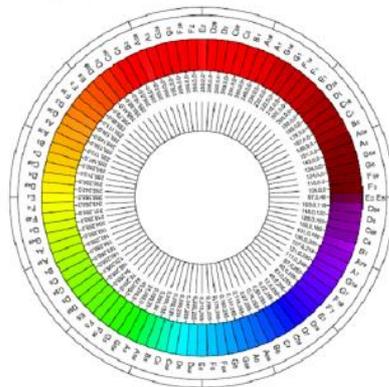


Fig. 9 Correspondencia entre la franja de luz visible y franja de tonos de instrumentos musicales



*Ilustración 9. Resultados Pérez y Gilabert. Círculo Cromático Tonal-musical.*

## 3.2 Conversión de frecuencias a longitud de onda y viceversa

Es necesario comprender los conceptos de frecuencia y longitud de onda para poder explicar la relación natural que existe entre ellas. La frecuencia es la cantidad de perturbaciones por segundo (Hz, ciclos por segundo) y la Longitud de onda es la distancia que existe entre esas perturbaciones en el espacio. Si observamos una onda podemos apreciar que a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa.

A continuación se muestra un gráfico de la relación lineal entre la frecuencia acústica y la longitud de onda óptica (facu y Lopt) en los rangos de 400 nm a 750 nm y de 20Hz a 20KHz ascendente.

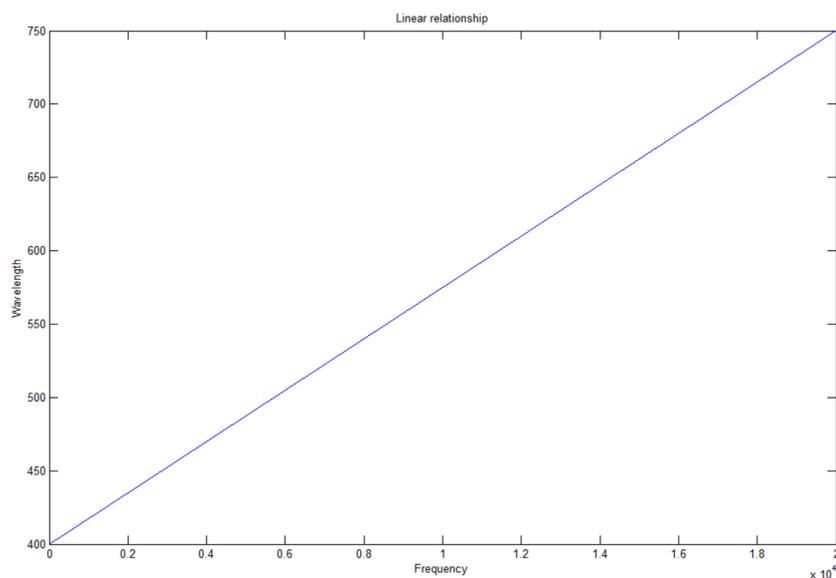


Ilustración 10. Relación Lineal Ascendente.

La respuesta es la misma a la inversa descendientemente, ya que se trata de una relación lineal.

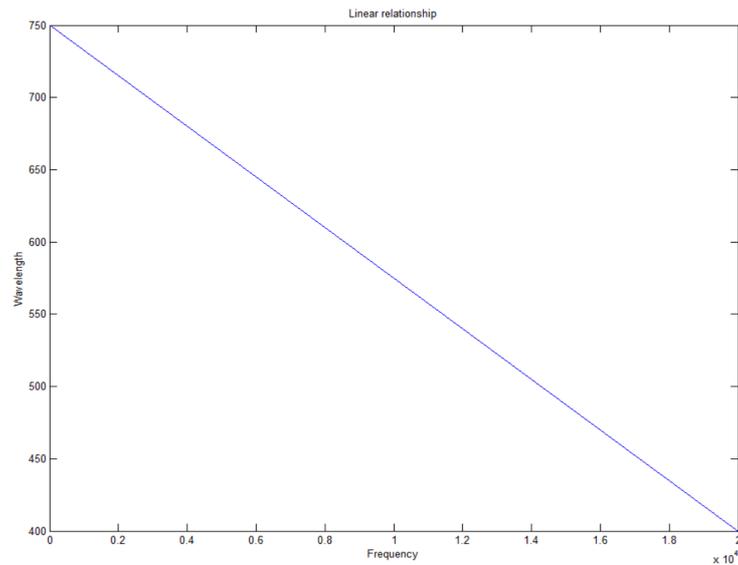


Ilustración 11. Relación Lineal Descendente.

### 3.3 Método Propuesto: Conversión basada en la Fisiología

Tras conocer las investigaciones realizadas hasta el momento y analizando las distintas fortalezas y debilidades de estas, surge la posibilidad de desarrollar la propuesta que se plantea en este trabajo.

El método propuesto parte de la búsqueda de una relación entre la frecuencia y la longitud de onda que se asemeje a la realidad física y fisiológica que percibe el ser humano.

Las pautas que se concretan para llevarlo a cabo parten del planteamiento de una ecuación para la conversión  $f_{acu}$ - $\lambda_{opt}$  basado en la fisiología, la transformación de los resultados obtenidos como "x,y,z" en valores "R,G,B" y la representación de estos valores en una matriz que constituye la interfaz.



Ilustración 12. Esquema funcional

Para realizar una conversión de frecuencia a longitud de onda que se asemeje a la percepción que tiene el ser humano de estas al compararlas, es necesario partir de los valores más característicos y sensibles en el rango de la audición y de la vista.

Las curvas de respuesta de los distintos órganos constituyen el punto de partida para los obtención de los parámetros de mayor sensibilidad.

A continuación se explican las fórmulas que se han tomado de referencia para la continuación del proyecto.

### 3.3.1 Función de eficiencia luminosa espectral.

En 1924, la CIE (Comision Internationale de l'Eclairage) estandarizó internacionalmente la función de eficiencia luminosa espectral (*spectral luminous efficiency function*) para la visión fotópica (indicada con  $V(\lambda)$ ). A pesar de no considerarse perfectamente exacta para todos los casos, es una representación muy cercana a la sensibilidad visual del ojo humano y se utiliza con propósitos experimentales.

En base a la respuesta de los fotorreceptores que se encuentran en la retina del ojo se establece un rango de visión que abarca entre 400nm y 750nm cuyo punto de máxima sensibilidad se sitúa en los 550 nm (al color amarillo) según la comisión internacional CIE.

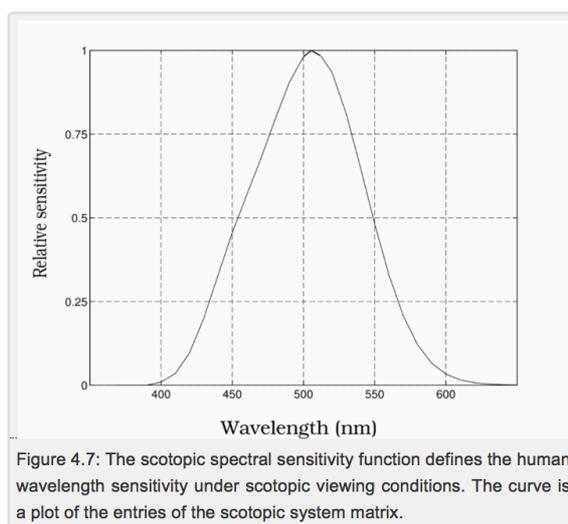


Ilustración 13. Función de eficiencia luminosa espectral.

### 3.3.2 Ponderación normalizada A

En cuanto al rango de audición, cabe destacar que el oído humano no tiene la misma sensibilidad para todas las frecuencias y por ello se han establecido diferentes curvas de ponderación (A,B,C,D y Z) que reflejan aproximadamente la respuesta del oído humano y los rangos de sensibilidad en función de la frecuencia.

La escala de referencia más utilizada es la ponderación A, ya que el oído es menos sensible a las bajas frecuencias. La unidad se representa como dB (A). Se encuentra definida en la Norma Internacional IEC 61672:2003 de la Comisión Internacional Electrotécnica y en la Norma UNE 21.314/75. Normalmente se utiliza para compensar las diferencias de sensibilidad que el oído humano tiene para las distintas frecuencias dentro del campo auditivo.

A partir de la fórmula que se encuentra a continuación y su representación en Matlab obtenemos el gráfico de la curva de ponderación A en base logarítmica.

$$R_A(f) = \frac{12200^2 \cdot f^4}{(f^2 + 20.6^2) \sqrt{(f^2 + 107.7^2)(f^2 + 737.9^2)} (f^2 + 12200^2)},$$

$$A(f) = 2.0 + 20 \log_{10}(R_A(f))$$

Ilustración 14. Fórmula de Ponderación A (A weighting)

```
function out = leyA(f)
out= 1.0875*(12200^2*f.^4)./((f.^2 +20.6^2).*sqrt((f.^2 +107.7^2).*(f.^2 +737.9^2)).*(f.^2 +12200^2));
```

Ilustración 15. Código de la Ponderación A en Matlab.

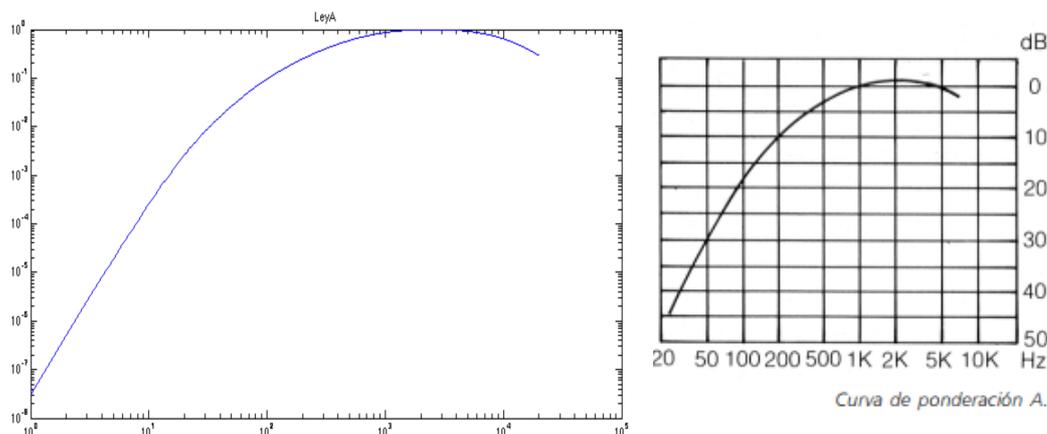


Ilustración 16. Curva de Ponderación A.

### 3.3.3 Ecuación de Conversión Fisiológica

Así, a partir de los rangos de sensibilidad obtenidos tanto por la CIE para la visión como por la escala de ponderación A para la audición, se propone la “Ecuación de Conversión Fisiológica”, la cual constituye la base fundamental de este proyecto.

Cuando se emite una señal (f) el oído responde de una determinada manera (S). Igualmente sucede con el color: Cuando se emite una señal ( $\lambda$ ) el ojo responde de una forma (V).

Las curvas de respuesta de ambos sentidos están normalizadas entre 0 y 1, por ello podemos hacer una equiparación de respuestas, estableciendo una correlación entre los valores que producen el máximo efecto en ambos sentidos, la máxima sensibilidad tanto en la vista como en el oído.

La lambda propuesta es el resultado de la respuesta inversa de la vista a la respuesta que tiene el oído de una determinada frecuencia.

$$\lambda = V^{-1}(S(f))$$

Donde ( $\lambda$ ) es la longitud de onda (V) La respuesta del ojo (S) respuesta del oído y (f) la frecuencia acústica.

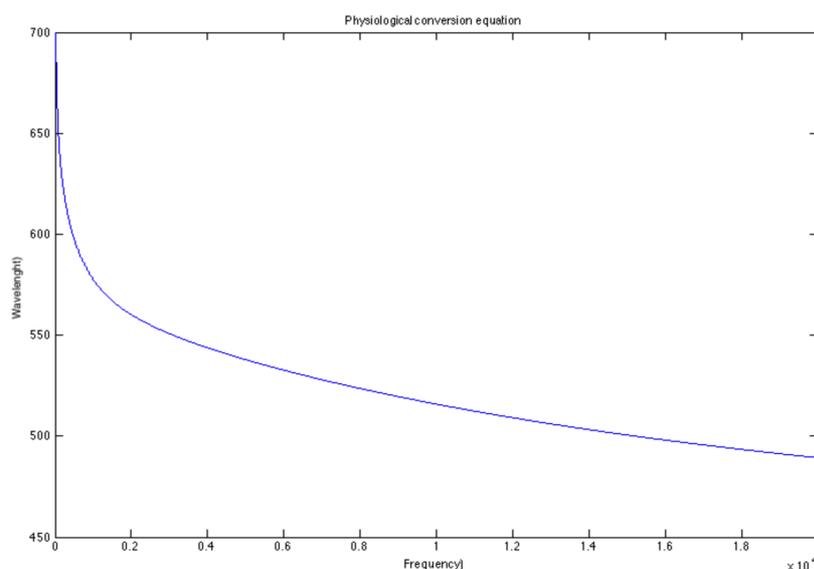


Ilustración 17. Ecuación de Conversión Fisiológica.

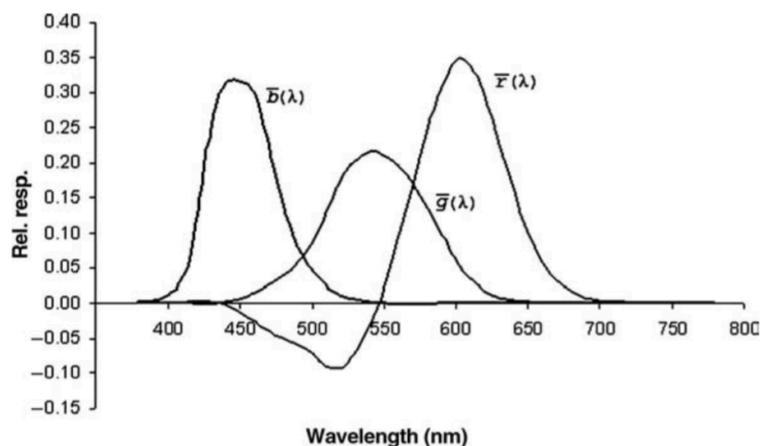
```
function Loptf=respfisio(f,a)
    Lc=555;
    s=42;
    fm=2512.51;
    S=leyA(f);
    Loptf=Lc+(-1)^a*sign(f-fm)*s.*sqrt(-2*log(S));
```

Ilustración 18. Código de la Ecuación de Conversión Fisiológica en Matlab.

### 3.3.3 CIE 1931 XYZ-RGB

A través de la ecuación de conversión fisiológica se obtiene una longitud de onda ( $\lambda$ ) a partir de una determinada frecuencia. El siguiente paso consiste en convertir esta longitud de onda en valores RGB. El espacio de color CIE 1931 XYZ permite representar el color (ondas electromagnéticas) basándose en 3 primarios imaginarios con caracterización espectral (X, Y y Z),

El observador colorimétrico estándar CIE 1931 se derivó de los resultados de dos investigaciones experimentales, llevadas a cabo por WD Wright<sup>6,7</sup> y J. Guild<sup>8</sup>. Para poder definir un observador estándar deben especificarse las composiciones espectrales y las luminancias de las primarias. Se utilizaron longitudes de onda únicas: 700 nm para el rojo, 546,1 nm para el verde y 435,8 nm para el primario azul. En 1931 la CIE decidió transformarse de las primarias [R], [G], [B] reales a un conjunto de primarias imaginarias [X], [Y], [Z].



$\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$  CMFs of the CIE 1931 standard colorimetric observer.

Ilustración 19. CIE 1931 XYZ.

The MathWorks, Inc. genera dos funciones para la realización de este apartado. La función “colorMatchFcn.m” (anexo 8) donde se encuentra un formulario con los valores xyz que se establecen en la CIE 1931 y la función “xyz2rgb.m” (anexo 9), que formula la ecuación para convertir los valores xyz en valores RGB.

### 3.4 Particularización para la ejecución y escucha musical.

En la exposición de resultados que tiene lugar en el capítulo 5 de este mismo documento se detalla la relación de colores a los que equivale cada frecuencia de las 88 teclas del piano, a excepción de la última franja que señala los valores para 5000, 10000, 15000 y 20000 Hz.

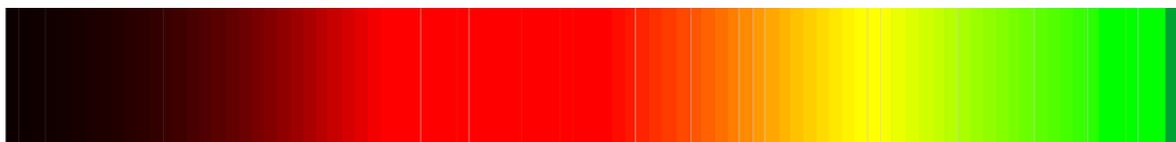


Ilustración 20. Colores de los 88 sonidos del piano.

La relación que se obtuvo como resultado permitía distinguir los sonidos prácticamente por escala musical en lugar de por notas independientes lo cual significaba que la diferencia entre una nota C (do) y una nota D (re) de una misma escala se reduciría a dos tonos muy semejantes de un mismo color. Por ello se consideró necesario adaptar la estructura fisiológica a un rango que se asemejase más a la realidad de la escucha musical y que pudiera aportar resultados que tuvieran cierta aplicación pedagógica, creativa o fisiológica.

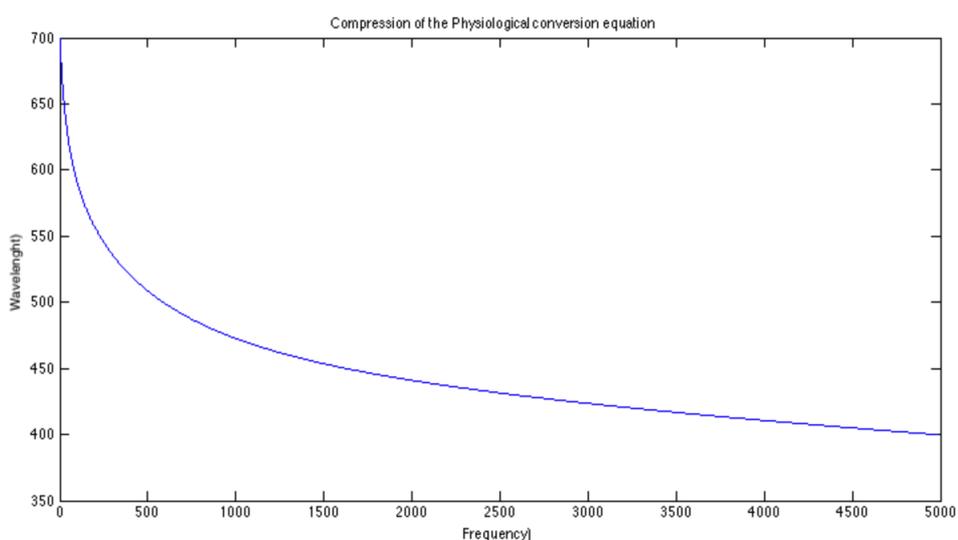


Ilustración 21. Compresión de la Ecuación de Conversión Fisiológica.



## CAPITULO 4

### Metodología

La metodología que se lleva a cabo se basa en la realización de diferentes experimentos que nos permitan desarrollar, aplicar y evaluar la teoría propuesta.

En este capítulo se presenta la base de datos, el tratamiento de la señal, la conversión fisiológica, la transformación (x,y,z) a (R,G,B) y el diseño de la matriz que actúa como interfaz.

#### 4.1 Generación de la base de datos

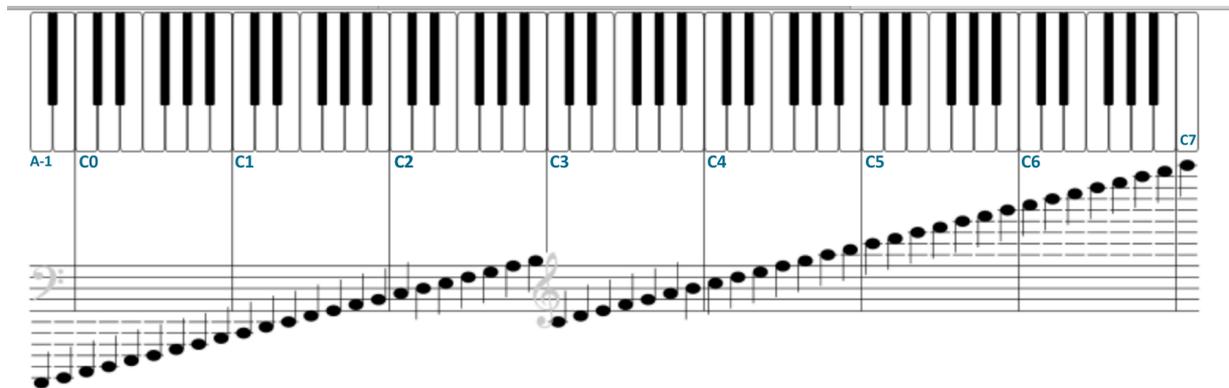
Con el fin de obtener un registro amplio de frecuencias que abarquen la mayoría de las composiciones que escuchamos se toman de referencia las 88 teclas de un piano. A pesar de que el rango de percepción acústica abarque desde los 20Hz a los 20KHz, la música y los sonidos que se escuchan e interpretan normalmente se sitúan entre los 275Hz y los 5000Hz.

El teclado de un piano se estructura por “octavas”. Se le denomina octava al rango de notas que abarca una escala completa (DO, DO#, RE, RE#, MI, FA, FA#, SOL, SOL#, LA, LA#, SI). Estos 12 sonidos se repiten de forma ordenada por el teclado hasta completar los 88 sonidos del piano. Encontramos así que el teclado se compone de 7 octavas y 4 notas. (12x7+4) comenzando desde la nota LA (A).

Musicalmente y con el fin de unificar conceptos, para este proyecto se utilizará el sistema Franco-Belga que indica que el Do central es el de la 2ª línea adicional inferior en clave de Fa en 4º. Así el La3 (A3) será el de 440Hz. Del mismo modo se utilizará la nomenclatura anglosajona para el nombre de las notas, cuya escala empieza en la nota LA(A):

LA	LA#	SI	DO	DO#	RE	RE#	MI	FA	FA#	SOL	SOL#
A	A#	B	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#

En la imagen que se presenta a continuación podemos observar un teclado junto a la correspondencia musical según el rango de frecuencias en el que nos encontremos.



*Ilustración 22. Correspondencia del teclado con las notas en clave de Fa.*

Para la generación de la base de datos y la obtención de cada una de las notas se han utilizado dos métodos: Por grabación de audio, el programa Logic Pro X (Software para la edición de audio y MIDI que funciona en la plataforma Mac OS X) y por la ecuación matemática del “Sistema Temperado de 12 notas”.

#### *Por grabación de audio:*

Se ha conectado un teclado maestro Roland A88 por USB al MacBook Pro. Desde el Logic se creó una serie de pistas de instrumento software a la que se les asignó el sonido de Piano de “Steinway Grand Piano”. Se comenzó a grabar tecla por tecla cada uno de los sonidos en pistas independientes con una duración de 4 segundos.

#### *Por sistema Temperado de 12 notas:*

Es el sistema de afinación que más se utiliza actualmente. En término musicales, entre una nota y otra (intervalo) existe una determinada distancia (tono o semitono). En la música occidental la distancia más corta es un semitono. Se denomina semitono temperado a la doceava parte de una octava ( $1/12$ ). Ese intervalo mínimo de un semitono será siempre igual entre una nota y la consecutiva. (Ejemplo: C y C#/Db)

$$F_{n+1} = F_n 2^{(1/12)}$$

A partir de la ecuación del sistema temperado y partiendo de la nota A a 440Hz, se obtienen todas las frecuencias puras de las notas musicales. Para la realización de la tabla de resultados que se expone en el capítulo 5 se ha utilizado ese sistema.

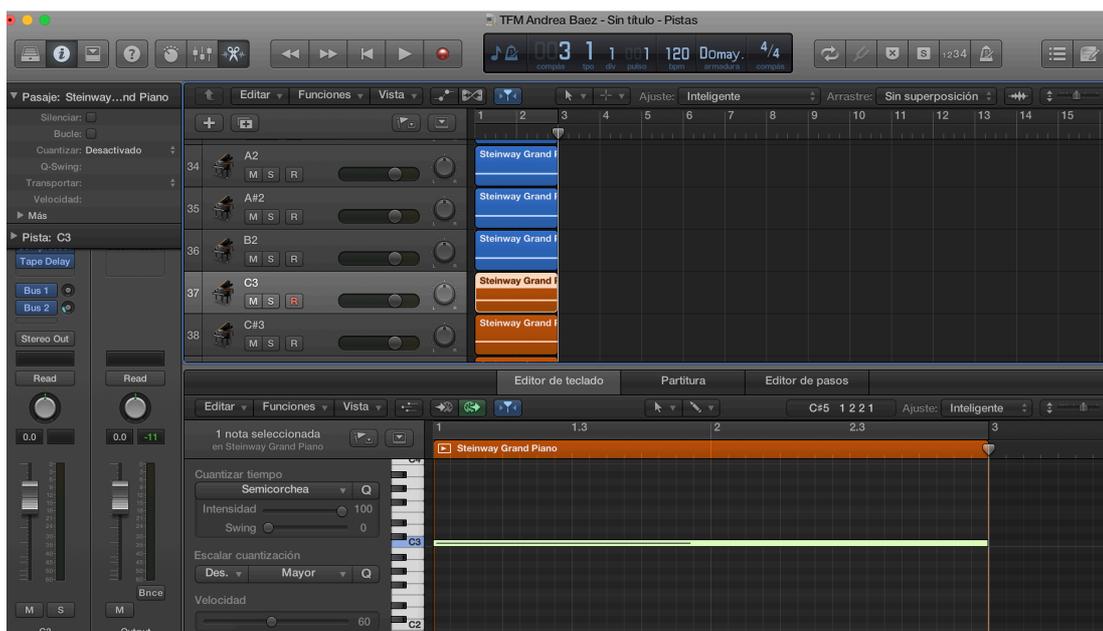


Ilustración 23. Grabación y edición de audio en Logic Pro X.

## 4.2 Pre-procesado de las señales de audio

A continuación procede analizar la señal con la que se ha trabajado. Debemos tener en cuenta que primero se necesita preparar y acondicionar dicha señal para extraer cuáles son sus características más relevantes. El fin consiste en enfatizar los aspectos que necesitamos extraer o bien en atenuar aquellos factores que no permitan analizar la señal correctamente, como por ejemplo, el ruido.

Se toma una señal de 440 Hz y duración 4 segundos correspondiente a la nota A3.

“El oído humano, por medio del caracol, descompone las señales auditivas que le llegan en sus frecuencias fundamentales y esta es la información básica a partir de la cual se elaboran las señales que le llegan al cerebro. Por tanto el proceso de audición se fundamenta en la

descomposición en frecuencias de la señal sonora (Descomposición de una señal compleja en sumatorio de señales simples)” ([9]J. Bobadilla, 1999)

La representación inicial de nuestra señal se encuentra en el dominio del tiempo. Dado que nos interesa extraer las frecuencias de las señales simples con mayor amplitud, necesitamos transformar la señal al dominio de la frecuencia. Por lo que nuestro primer paso de procesado comienza con el cálculo de la Transformada de Fourier (FT).

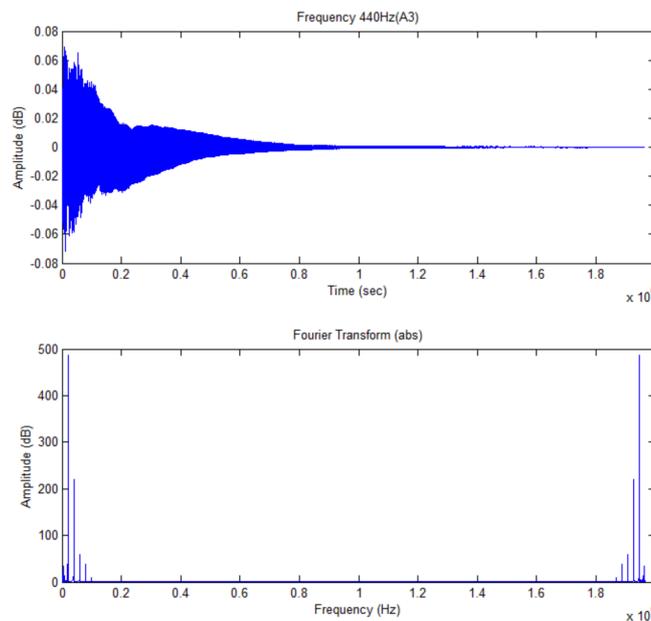
El fundamento en el que se basa la TF estriba en la comparación de diversas ondas sinusoidales y cosenoidales simples con nuestra señal, cuanto más coincida una onda simple con la señal compleja, mayor importancia tiene su frecuencia en la determinación de la señal original”. ([9]J. Bobadilla, 1999)

$$F\left(\frac{n}{NT}\right) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} m(kT) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}} \quad n = 0, 1, \dots, *N-1$$

**FORMULACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE FOURIER**

*Ilustración 24. Transformada de Fourier.*

En la figura adjunta se puede observar la señal en ambos dominios.



*Ilustración 25. Procesado de la señal de audio.*

### 4.3 Técnicas de representación visual

El cómo se representan los resultados de la conversión propuesta es fundamental para el desarrollo de este proyecto, ya que la expresión de estos datos en forma audiovisual es lo que permite llevar a cabo la relación comparativa del color y el sonido.

Aunque el color es un elemento espacial frente al sonido que es temporal, el desarrollo de ambos, mediante el tamaño y la duración, está relacionado con el ritmo, característica básica en todas las expresiones artísticas. Viene determinado por la repetición de elementos en un intervalo espacial o temporal concreto y depende de la periodicidad con la que se iteran los elementos y el modo en el que se organizan.[10] (Vitamina Gráfica, 2012)

Toda representación visual parte de dos conceptos:

- El Contenido, que son los mensajes que se van a transmitir y lo que significa.
- La Forma, que constituye el medio para transmitir el contenido. Se trata de un diseño gráfico que estructura u organiza el contenido.

Es necesario tener en cuenta que el color es un elemento espacial, mientras que el sonido es un elemento temporal, lo cual requiere de la búsqueda de un elemento común que nos permita expresar la misma expresión. Por ello para este proyecto se diseñó una matriz en formato de video.

Los valores resultantes de la conversión propuesta se exponen en formato video. Su codificación se puede consultar en el archivo getFisioRGB.m del Anexo 4 de este mismo documento.



## CAPITULO 5

---

### Resultados

En este apartado se exponen las diferentes pruebas que se tuvieron que llevar a cabo a lo largo del trabajo para desarrollar y comprobar la teoría propuesta. Se implementó una serie de algoritmos para generar una matriz que sirviese de interfaz en la que representar el resultado del proceso de conversión frecuencia-longitud de onda a nivel fisiológico.

Por una cuestión estratégica y dado que en muchos de los casos la prueba no consiste meramente en la reproducción de un sonido, sino en la representación de un archivo de audio en el que se está reproduciendo una canción, fue necesario exportar los resultados como archivo de vídeo.

Una canción, se compone, entre otras cosas, de dos partes fundamentales: la melodía y la armonía. La melodía se expresa como una secuencia ordenada de sonidos en cadena. Eso quiere decir que una nota irá sonando después de otra y que por tanto podemos observar en el tiempo como se van representando en color las frecuencias que van sonando.

Por otro lado, la armonía se fundamenta en la ejecución de varios sonidos simultáneamente, por lo que la frecuencia total de la unión de esos sonidos dará lugar a una mezcla de colores que aparecen en el mismo instante de tiempo.

En conjunto la música es la unión ordenada de frecuencias que generan armonía en el tiempo. Partiendo de esta base se establecen distintos tipos de experimentos que se detallan a continuación: la representación de una nota simple, de una melodía, de un acorde y de una canción.

#### 5.1 Relación fisiológica y su particularización.

A continuación se presenta la tabla general de resultados de la propuesta fisiológica.

Tabla 3. Resultados de la propuesta fisiológica.

Resultados de la propuesta						
B#	Nº	Nota	$f_{acu}$ (Hz)	$\lambda_{opt}$ (Lineal-nm)	$\lambda_{opt}$ (Fisio-nm)	COLOR (Fisio)
-1	1	A	27,5000	400,1314	688,4596	
	2	Bb/A#	29,1352	400,1600	686,4391	
	3	B	30,8677	400,1904	684,4333	
0	4	C	32,7032	400,2225	682,4420	
	5	Db/C#	34,6478	400,2566	680,4647	
	6	D	36,7081	400,2927	678,5008	
	7	Eb/D#	38,8909	400,3309	676,5498	
	8	E	41,2034	400,3714	674,6110	
	9	F	43,6535	400,4144	672,6836	
	10	Gb/F#	46,2493	400,4598	670,7671	
1	11	G	48,9994	400,5080	668,8610	
	12	Ab/G#	51,9131	400,5590	666,9646	
	13	A	55,0000	400,6131	665,0776	
	14	Bb/A#	58,2705	400,6704	663,1997	
	15	B	61,7354	400,7311	661,3305	
	16	C	65,4064	400,7954	659,4700	
	17	Db/C#	69,2957	400,8635	657,6180	
	18	D	73,4162	400,9357	655,7747	
	19	Eb/D#	77,7817	401,0122	653,9400	
	20	E	82,4069	401,0932	652,1142	
	21	F	87,3071	401,1791	650,2973	
	22	Gb/F#	92,4986	401,2700	648,4896	
	23	G	97,9989	401,3663	646,6911	
	24	Ab/G#	103,826	401,4684	644,9020	
	25	A	110,000	401,5766	643,1221	
26	Bb/A#	116,541	401,6912	641,3515		
27	B	123,471	401,8126	639,5898		
2	28	C	130,813	401,9412	637,8369	
	29	Db/C#	138,591	402,0774	636,0923	
	30	D	146,832	402,2218	634,3552	
	31	Eb/D#	155,563	402,3747	632,6251	
	32	E	164,814	402,5368	630,9010	
	33	F	174,614	402,7085	629,1824	
	34	Gb/F#	184,997	402,8903	627,4680	
	35	G	195,998	403,0830	625,7568	
	36	Ab/G#	207,652	403,2872	624,0480	
	37	A	220,000	403,5035	622,3403	
38	Bb/A#	233,082	403,7327	620,6328		
39	B	246,942	403,9755	618,9245		
3	40	C	261,626	404,2327	617,2147	
	41	Db/C#	277,183	404,5052	615,5026	
	42	D	293,665	404,7939	613,7875	
	43	Eb/D#	311,127	405,0998	612,0691	
	44	E	329,628	405,4239	610,3470	
	45	F	349,228	405,7673	608,6213	
	46	Gb/F#	369,994	406,1310	606,8920	
	47	G	391,995	406,5164	605,1595	
	48	Ab/G#	415,305	406,9248	603,4244	
	49	A	440,000	407,3574	601,6877	
	50	Bb/A#	466,164	407,8157	599,9504	
51	B	493,883	408,3013	598,2137		
4	52	C	523,251	408,8157	596,4791	
	53	Db/C#	554,365	409,3607	594,7483	
	54	D	587,330	409,9382	593,0230	
	55	Eb/D#	622,254	410,5500	591,3053	
	56	E	659,255	411,1982	589,5969	
	57	F	698,456	411,8849	587,9000	
	58	Gb/F#	739,989	412,6124	586,2164	
	59	G	783,991	413,3832	584,5481	
	60	Ab/G#	830,609	414,1999	582,8967	
	61	A	880,000	415,0651	581,2640	
	62	Bb/A#	932,328	415,9817	579,6512	
	63	B	987,767	416,9529	578,0594	
	64	C	1046,50	417,9817	576,4897	
	65	Db/C#	1108,73	419,0718	574,9423	
	66	D	1174,66	420,2268	573,4176	
67	Eb/D#	1244,51	421,4504	571,9156		
68	E	1318,51	422,7467	570,4358		
69	F	1396,91	424,1200	568,9775		
70	Gb/F#	1479,98	425,5752	567,5396		
71	G	1567,98	425,5752	566,1209		
72	Ab/G#	1661,22	428,7501	564,7197		
73	A	1760,00	430,4805	563,3343		
74	Bb/A#	1864,66	432,3139	561,9625		
75	B	1975,53	434,2560	560,6024		
76	C	2093,00	436,3138	559,2514		
77	Db/C#	2217,46	438,4940	557,9075		
78	D	2349,32	440,8039	556,5700		
79	Eb/D#	2489,02	443,2511	555,2824		
80	E	2637,02	445,8437	553,8603		
81	F	2793,83	448,5906	552,5188		
82	Gb/F#	2959,96	451,5008	551,1636		
83	G	3135,96	454,5839	549,7957		
84	Ab/G#	3322,44	457,8506	548,4127		
85	A	3520,00	461,3113	547,0119		
86	Bb/A#	3729,31	464,9779	545,5903		
87	B	3951,07	468,8626	544,1448		
7	88	C	4186,01	472,9782	542,6728	
			$f_{acu}$ (Hz)	$\lambda_{opt}$ (Lineal-nm)	$\lambda_{opt}$ (Fisio-nm)	COLOR (Fisio)
			5000	487,2372	537,9495	
			10000	574,8248	515,9227	
			15000	662,4124	500,6165	
			20000	750	489,3469	

Tabla 4. Resultados de la particularización de la ecuación de conversión fisiológica.

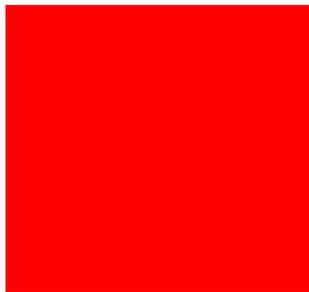
Resultados de la particularización para la escucha musical de la ecuación de conversión fisiológica					
8ª	Nº	Nota	f <sub>acu</sub> (Hz)	λ <sub>opt</sub> (FisioComp-nm)	COLOR (Fisio)
-1	1	A	27,5000	678,8699	
	2	Bb/A#	29,1352	675,1263	
	3	B	30,8677	671,4099	
0	4	C	32,7032	667,7204	
	5	Db/C#	34,6478	664,0568	
	6	D	36,7081	660,4181	
	7	Eb/D#	38,8909	656,8031	
	8	E	41,2034	653,2108	
	9	F	43,6535	649,6397	
	10	Gb/F#	46,2493	646,0888	
	11	G	48,9994	642,5570	
	12	Ab/G#	51,9131	639,0434	
	13	A	55,0000	635,5471	
	14	Bb/A#	58,2705	632,0675	
	15	B	61,7354	628,6043	
1	16	C	65,4064	625,1570	
	17	Db/C#	69,2957	621,7256	
	18	D	73,4162	618,3101	
	19	Eb/D#	77,7817	614,9110	
	20	E	82,4069	611,5280	
	21	F	87,3071	608,1617	
	22	Gb/F#	92,4986	604,8123	
	23	G	97,9989	601,4800	
	24	Ab/G#	103,826	598,1651	
	25	A	110,000	594,8672	
	26	Bb/A#	116,541	591,5865	
	27	B	123,471	588,3225	
2	28	C	130,813	585,0745	
	29	Db/C#	138,591	581,8421	
	30	D	146,832	578,6236	
	31	Eb/D#	155,563	575,4181	
	32	E	164,814	572,2236	
	33	F	174,614	569,0393	
	34	Gb/F#	184,997	565,8628	
	35	G	195,998	562,6922	
	36	Ab/G#	207,652	559,5261	
	37	A	220,000	556,3620	
	38	Bb/A#	233,082	553,1983	
	39	B	246,942	550,0332	
3	40	C	261,626	546,8652	
	41	Db/C#	277,183	543,6929	
	42	D	293,665	540,5152	
	43	Eb/D#	311,127	537,3312	
	44	E	329,628	534,1404	
	45	F	349,228	530,9430	
	46	Gb/F#	369,994	527,7389	
	47	G	391,995	524,5289	
	48	Ab/G#	415,305	521,3141	
	49	A	440,000	518,0963	
	50	Bb/A#	466,164	514,8773	
	51	B	493,883	511,6595	
4	52	C	523,251	508,4456	
	53	Db/C#	554,365	505,2387	
	54	D	587,330	502,0420	
	55	Eb/D#	622,254	498,8593	
	56	E	659,255	495,6940	
	57	F	698,456	492,5499	
	58	Gb/F#	739,989	489,4305	
	59	G	783,991	486,3394	
	60	Ab/G#	830,609	483,2797	
	61	A	880,000	480,2545	
	62	Bb/A#	932,328	477,2662	
	63	B	987,767	474,3170	
5	64	C	1046,50	471,4086	
	65	Db/C#	1108,73	468,5415	
	66	D	1174,66	465,7165	
	67	Eb/D#	1244,51	462,9335	
	68	E	1318,51	460,1917	
	69	F	1396,91	457,4898	
	70	Gb/F#	1479,98	454,8255	
	71	G	1567,98	452,1969	
	72	Ab/G#	1661,22	449,6007	
	73	A	1760,00	447,0338	
	74	Bb/A#	1864,66	444,4921	
	75	B	1975,53	441,9721	
6	76	C	2093,00	439,4689	
	77	Db/C#	2217,46	436,9788	
	78	D	2349,32	434,5008	
	79	Eb/D#	2489,02	432,1151	
	80	E	2637,02	429,801	
	81	F	2793,83	426,9946	
	82	Gb/F#	2959,96	424,4836	
	83	G	3135,96	421,9492	
	84	Ab/G#	3322,44	419,3867	
	85	A	3520,00	416,7912	
	86	Bb/A#	3729,31	414,1571	
	87	B	3951,07	411,4790	
7	88	C	4186,01	408,7516	

En la tabla 3 se presentan las 88 notas musical organizadas por escalas. Para cada nota se establece el valor de su frecuencia, la longitud de onda que le corresponde tras la conversión lineal y la longitud de onda resultante de la ecuación fisiológica. El color que observamos es el resultado de esta propuesta.

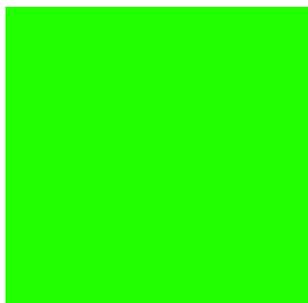
En la tabla 4 se encuentran los resultados de la particularización de la ecuación de conversión fisiológica, aportando para cada nota la longitud de onda al aplicar la compresión. El color que observamos corresponde a la dicha longitud de onda tras su adaptación.

Se puede apreciar como varía el resultado. Se debe tener en cuenta que el primer resultado corresponde a la aplicación de la propuesta y que el segundo es una adaptación de este estudio para la ejecución y escucha musical en el rango de 20Hz a 5000Hz.

A continuación podemos observar la nota C3 (do) por ambas propuestas.



*Ilustración 26. C3.261.626Hz Tabla 3.*



*Ilustración 27. C3.261.626Hz. Tabla 4.*

## 5.2 Representación de una nota simple

De los resultados de las pruebas de este apartado, se concluye la tabla de asignación sonido-color que se expone en esta propuesta. Al igual que en los antecedentes los autores relacionaron las notas de la escala con un color determinado. A continuación se presenta una misma nota, la nota A (la) en orden de octavas ascendentes (de menor a mayor frecuencia).



*Ilustración 28. As.27.5Hz.*



*Ilustración 29. A0.55Hz.*



*Ilustración 30. A1.110Hz.*



*Ilustración 32. A2.220Hz.*



*Ilustración 35. A3.440Hz.*



*Ilustración 34. A4.880Hz.*



*Ilustración 33. A5.1760Hz.*



*Ilustración 31. A6.3520Hz.*

Se puede observar como la diferencia de color entre una frecuencia de 27.5Hz (nota A5) y una frecuencia de 55Hz (nota A4) es prácticamente inapreciable. Eso quiere decir que el resto de las notas que se encuentran en la primera octava musical son una sucesión de tonos oscuros casi imposible de distinguir.

Continuando con la representación de los resultados se procede a reproducir el sonido de la nota A (la) que se obtuvo de la base de datos en el capítulo 4. Se trata de un sonido de piano de duración 4 segundos y cuya frecuencia se ve modulada con el tiempo generando armónicos.

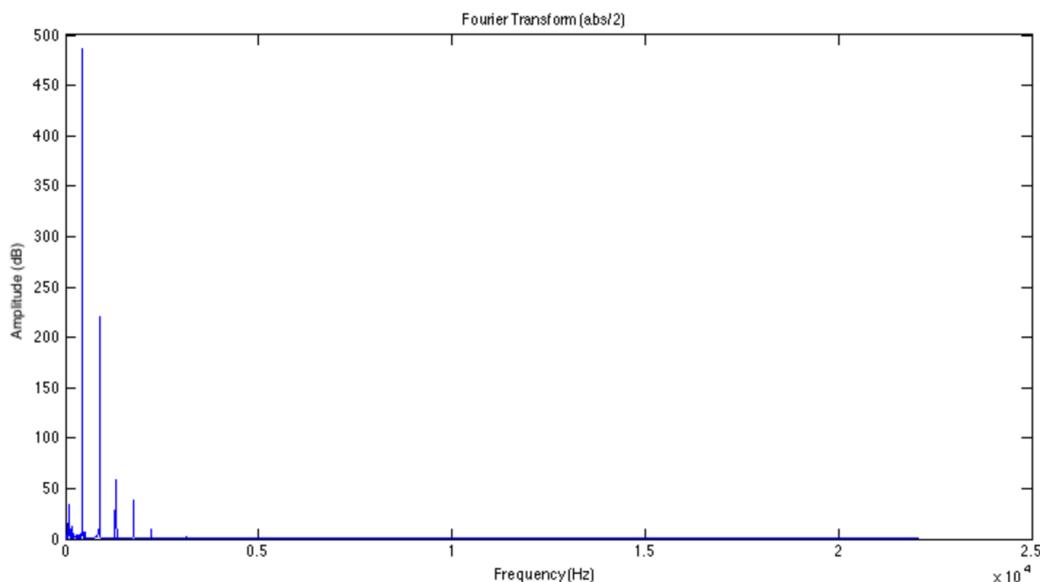


Ilustración 36. FFT sonido A3 piano wav.

En la ilustración 36, se observa como el sonido A3 tiene una frecuencia predominante en los 440 Hz. Se le aplica el procesamiento de señal y la codificación del proyecto, dando lugar a una matriz de video. Durante la reproducción del mismo, se aparecen colores a medida que recorre la señal por ventanas. Estos colores son variantes de rojo debido a los armónicos, llegando a tomar importancia en el segundo 00:04. A continuación se presentan capturas de pantalla de la matriz de video generada al emitir la nota A3 (la).



Ilustración 37. Nota A3 piano .wav segundo 00:00.



Ilustración 38. Nota A3 piano .wav segundo 00:02.

En la ilustración 37, se observa como predomina el color rojo equivalente a la frecuencia de 440Hz, a una longitud de 601,6877nm según la tabla de resultados de esta propuesta. Se puede apreciar como coinciden el color de la frecuencia pura del A3 que se observa en la ilustración 32 con el color de esta captura de video.



*Ilustración 39. Nota A3 piano .wav segundo 00:04.*

En la ilustración 39, se observa el armónico dominante que se produce durante la reproducción de la señal.



*Ilustración 40. Nota A3 piano .wav segundo 00:05.*

La presencia del armónico es de corta duración y en solo cuestión de un segundo ya se puede observar en la ilustración 40 como coexisten ambas frecuencias antes de volver a predominar la del sonido 440Hz en la ilustración 41, coincidiendo con el final de la reproducción del video.



*Ilustración 41. Nota A3 piano .wav segundo 00:07.*

### 5.3 Representación de un acorde

Resulta interesante el experimento basado en acordes ya que estos constituyen la ejecución de varios sonidos simultáneamente, lo que es un primer acercamiento a la reproducción de una canción.

El Ruido blanco es una señal aleatoria que contiene todas las frecuencias del espectro en una misma potencia. La ejecución en tiempo de todas esas frecuencias nos permite observar el comportamiento de la señal en todo el espectro, como si se tratase de un acorde armónico de larga duración.



Ilustración 42. Ruido Blanco.

Como prueba experimental se interpretó al piano un acorde de Do Mayor que está formado por tres notas que se ejecutan simultáneamente: El C3 (do) 261.626Hz, el E3(mi) 329.628Hz y el G3(sol) 391.995Hz, dando lugar a otras frecuencias y correspondiendo a la siguiente imagen:



Ilustración 43. Acorde de C (do mayor) sonido piano .wav

Para ampliar el espectro se realizó otro acorde de C (do mayor) abierto en frecuencias, es decir, ejecutando el C0 (32,7032 Hz) el E3 (329,628Hz) E4 (1318,51) el E5 (1318,51HZ) el G6 (3135,96Hz) y C8 (Nota que se encuentra fuera del rango de las 88 teclas del piano pero que pudo ser interpretada vía midi como instrumento virtual en Logic). Estas notas se tocaron simultáneamente con duración de una negra musical durante tres compases de tiempo a 120 bpm, con el fin de que las frecuencias fueran intensas durante toda la reproducción del video.

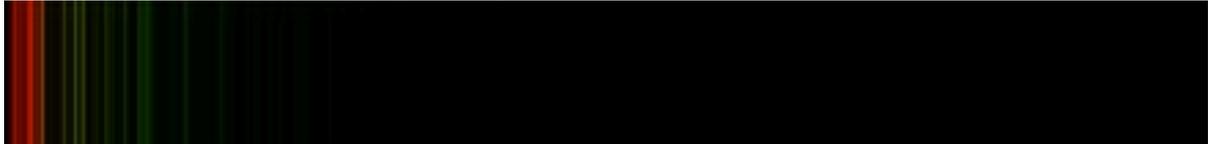


Ilustración 44. Acorde de C (do mayor) abierto en frecuencias.

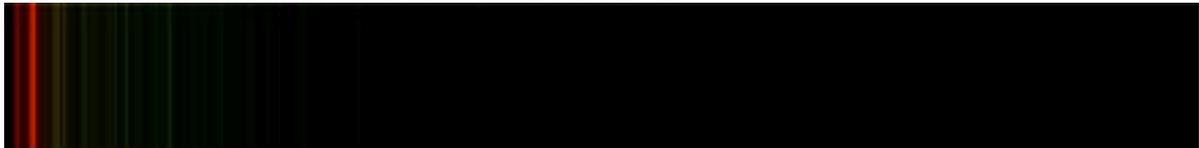
Cada uno de los colores que se reflejan en la ilustración 44 coinciden con las frecuencias que se ejecutaron simultáneamente.

## 5.4 Representación de una canción

A continuación se presentan una serie de capturas de video resultantes de la representación de un fragmento de la obra “La Primavera” de “Las cuatro estaciones” de Antonio Vivaldi. Se toma como ejemplo este fragmento para reflejar el juego musical que lleva a cabo la sección de cuerda. Se trata de una parte en la que se quedan en frecuencias muy graves y en la que poco a poco comienzan frases sueltas del primer violín en frecuencias muy agudas.



*Ilustración 45. Fragmento de "La Primavera" de Vivaldi. Segundo 00:00.*



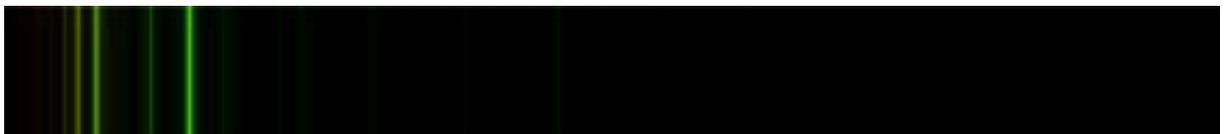
*Ilustración 46. Fragmento de "La Primavera" de Vivaldi. Segundo 00:13.*

En la ilustración 46 se observa como predomina el color rojo, se debe a la sección de la canción es la que los instrumentos de cuerda ejecutan frecuencias graves.



*Ilustración 47. Fragmento de "La Primavera" de Vivaldi. Segundo 00:33.*

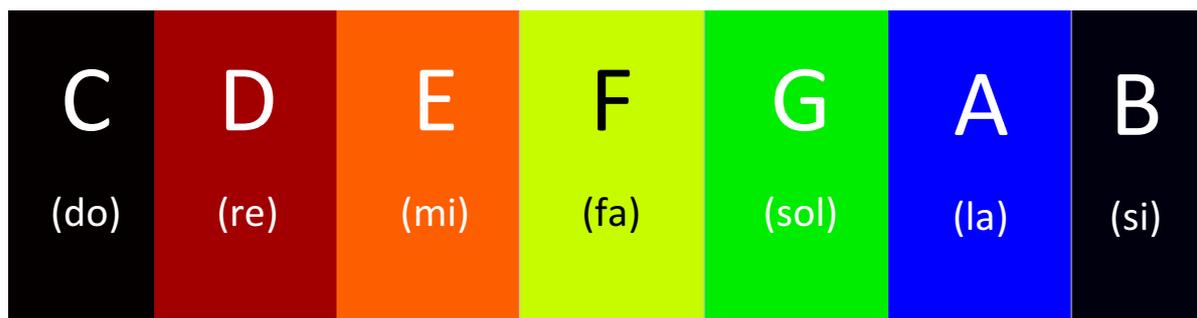
En la ilustración 47 se aprecia la entrada del primer violín que ejecuta una melodía en frecuencias altas.



*Ilustración 48. Fragmento de "La Primavera" de Vivaldi. Segundo 00:37.*

## 5.5 Resultados de la particularización escalar

Dado que los resultados de la ecuación de conversión fisiológica y los de la particularización a la escucha musical no permiten proponer una asignación colorimétrica diferente para cada nota dentro de una escala, se llevó a cabo una nueva particularización acotando los valores de frecuencia en la escala central del piano, 404.2327Hz y 493.883Hz, entre el C3 (do) de y el B3 (si) respectivamente. El resultado de la propuesta para cada nota es el siguiente:



*Ilustración 49. Asignación de color a cada nota de la escala por compresión de código.*



## CAPITULO 6

---

### Conclusiones y Líneas Futuras

En este capítulo se presentan las conclusiones a las que se ha llegado con el desarrollo del trabajo que se presenta en este documento, teniendo en cuenta aquellos apartados que no pudieron llevarse a cabo.

En términos generales la propuesta pretende servir de acercamiento como estudio previo para futuros proyectos.

#### 6.1 Prueba Psicológica de aplicación Pedagógica y Artística

Para contribuir al aporte de trazabilidad de los resultados se propuso desarrollar un test a partir de los datos obtenidos. En dicha investigación social se expondría una serie de usuarios a fragmentos de audio y video que tendrían que asociar entre sí. En función de las respuestas se podría deducir si coincide la percepción natural y la fórmula que se ha desarrollado a nivel fisiológico. Desde un enfoque experimental, las pautas que se llevan a cabo son:

- El diseño de la investigación.
- Recogida y análisis de los datos.
- Interpretación de los resultados.

A pesar de que las pruebas no pudieron llevarse a cabo por cuestiones de tiempo, se hubiese seleccionado un número aleatorio de sujetos y de forma individual realizarían cierta cantidad de experimentos durante un tiempo determinado. Esta labor no se concreta y queda como propuesta para líneas futuras.

## Bibliografía

- [1]Sinclair, J. (1998). *Collins English Dictionary*. HarperCollins Publishers.
- [2]Valdellós, A. M. (2007). Historia de la relación música/imagen desde Aristóteles de los videojockeys(I): Sinestesia, experimentación artística y música en el cine. *Sinfonía Virtual: Revista de música clásica y reflexión musical.*, N°3,Abril, 2007.
- [3]Newton, I. (1704). *Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light* (4 ed.). London: Dover Publications.
- [4]Rousseau, J. J. (2011). *Escritos sobre música*. Universitat de València: Col.lecció Estètica & Crítica.
- [5]Goldstein, E. (2010). *Encyclopeddia of perception, Volumen I*. University of Pittsburgh & University of Arizona.: SAGE.
- [6]Taboada, J. (1979). *Manual de Luminotecnia*. Dossat/OSRAM.
- [7]Howard, D. L. (2004). *"The sound of color"*. Wichita State University.
- [8]Gilabert, J. P. (2010). *Color y música: Relaciones físicas entre tonos de color y notas musicales*. Departamento de Ing. Gráfica de la Universidad Politécnica de Valencia.
- [9]J. Bobadilla, P. G. (1999). La Transformada de Fourier. Una visión pedagógica. *Estudios de Fonética Experimental.*, págs. 41-74.
- [10]Escucho los colores, v. I. (2012). *Vitamina Gráfica*. Recuperado el 11 de 01 de 2017, de <https://vitaminagrafica.wordpress.com>:  
<https://vitaminagrafica.wordpress.com/tag/albert-munsell/>
- [11]Glimpse. (2009). The art + science of seeing. Volumen 2 issue 3. *Glimpse*, 57-68.
- [12]*Plataforma e-ducative aragonesa*. (s.f.). Recuperado el 12 de 01 de 2017, de [http://e-ducative.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3233/html/21\\_espectro\\_visible.html](http://e-ducative.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3233/html/21_espectro_visible.html)

## Anexo 1

### Codificación General del proyecto en Matlab.

```

%-----
% Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
% Trabajo de Fin de Master. Bimetic.
% Visualizacion del Sonido. Representacion de las frecuencias sonoras
% en el espectro Visible.
% AUTOR: Andrea Victoria Baez Hernandez
% TUTOR: Jose A.Rabadan Borges, Victor Guerra Yanez
%-----

close all;
clear all;
clc;
%Se exporta el archivo wav y Lo almacenamos con una variable.
[A3,fsA3]= wavread('A3.wav');

%Ruido Blanco
%A3 = randn(44100*2,1);

A3 = A3(:,1);
%Reproducimos la se0al.
%sound (A3,fsA3);
%Representamos la se0al.
%plot (A3);
%Valor absoluto de la transformada de Fourier
x=abs(fft(A3));
%plot(x);

%Observamos en una misma figura la se0al, la abs de la se0al y el filtro.

% figure
% subplot (211)
% plot (A3)
% title('Frequency 440Hz(A3)')
% ylabel 'Amplitude (dB)'
% xlabel 'Time (sec)'
%
% subplot (212)
% plot (x)
% title('Fourier Transform (abs)')
% ylabel 'Amplitude (dB)'
% xlabel 'Frequency (Hz)'

%Longitud
N= length(A3);
%%Segmentacion de la se0al. Generar una funcion que recorra la se0al en
%ventanas de 20ms que son 50Hz. (Nol: ventana de solapamiento,overlap),
%(Nw: Ventana)
f = [0:N-1]/N*fsA3;
f = f (1: N/2);
%x = x (1: N/2);
%figure
%plot (f,x);

Tw= 20e-3; %Tiempo que va a durar la ventana
Tol=20e-3; %Tiempo que dura la ventana de solape (overlap)
Nw=round(Tw*fsA3); %Las ventanas se definen en numero de muestras. Por eso se multiplica el tiempo*frecuencia
Nol=round(Tol*fsA3);

% Nx=length(x);

veces= floor((N-Nw)/Nol);
posiciones=zeros(1,veces);

[R,G,B]=getFisioRGB(Nw,fsA3);
UNOS = ones(50,1);

vidObj = VideoWriter('video.avi');
open(vidObj);

% Create an animation
for I= 1:veces
% Posici0n en el vector de audio
pos=1+(I-1)*Nol;
% Ventana en la posici0n actual
W=A3(pos:pos+Nw-1);
%FFT de la ventana actual
x=abs(fft(W));
% Como la fft nos da tambi0n el espectro negativo, nos quedamos solo
% con la parte positiva
x = x (1:floor(Nw/2));
% Normalizamos la FFT (el m0ximo ser0 1)
x = x/max(x);

% Creamos las matrices R,G y B para hacer el display
Rf= UNOS*(R.*x);
Gf= UNOS*(G.*x);
Bf= UNOS*(B.*x);

IMAGEN(:, :,1)=Rf;
IMAGEN(:, :,2)=Gf;
IMAGEN(:, :,3)=Bf;

imshow(IMAGEN);
currFrame = getframe;
writeVideo(vidObj,currFrame);
end

close(vidObj);

```

## Anexo 2

conversion.m

*Codificación de la conversión lineal en Matlab.*

```
%-----  
% Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
% Trabajo de Fin de Master. Bimetic.  
% Visualizacion del Sonido. Representacion de las frecuencias sonoras  
% en el espectro Visible.  
% AUTOR: Andrea Victoria Baez Hernandez  
% TUTOR: Jose A.Rabadan Borges, Victor Guerra Yanez  
%-----  
  
%Codigo de conversion lineal  
  
function Lopt=conversion(facu,Lh,L0,fh,f0)  
  
m =(Lh-L0)/(fh-f0);  
Lopt=L0+m*(facu-f0);  
  
%Para tomar los valores resultantes:  
  
%f=(20:20e3);  
%figure;  
%Resultado lineal ascendente  
%plot(f,conversion(f,400,750,20,20e3));  
%title('Linear relationship')  
%ylabel ('Wavelength')  
%xlabel ('Frequency')
```

## Anexo 3

respfisio.m

*Codificación de la ecuación de conversión fisiológica en Matlab.*

```
%-----  
% Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
% Trabajo de Fin de Master. Bimetic.  
% Visualizacion del Sonido. Representacion de las frecuencias sonoras  
% en el espectro Visible.  
% AUTOR: Andrea Victoria Baez Hernandez  
% TUTOR: Jose A.Rabadan Borges, Victor Guerra Yanez  
%-----  
  
%Codigo de la ecuacion de conversion fisiologica.  
  
function Loptf=respfisio(f,a)  
  
Lc=555;  
s=42;  
fm=2512.51;  
S=leyA(f);  
  
Loptf=Lc+(-1)^a*sign(f-fm)*s.*sqrt(-2*log(S));  
  
%Para tomar los valores resultantes:  
%a=0 o 1 (nos dara simbolo positivo o negativo)  
  
%f=(20:20e3);  
%a=1;  
%respfisio(f,a);  
  
%plot(f,respfisio(f,a));  
%title('Physiological conversion equation')  
%ylabel 'Wavelenght')  
%xlabel 'Frequency')
```

## Anexo 4

getFisioRGB.m

*Codificación de la conversión de lambda fisiológica a RGB.*

```
%-----  
% Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
% Trabajo de Fin de Master. Bimetic.  
% Visualizacion del Sonido. Representacion de las frecuencias sonoras  
% en el espectro Visible.  
% AUTOR: Andrea Victoria Baez Hernandez  
% TUTOR: Jose A.Rabadan Borges, Victor Guerra Yanez  
%-----  
  
%Codigo conversion de lambda fisiologica a RGB.  
  
function [R,G,B]=getFisioRGB(Nw,fs)  
  
ventana = [0:Nw/2-1]*fs/Nw;  
size(ventana)  
Lambda=respfisio(ventana,1); %Vector de Lambda  
  
[Lambdaf,xf,yf,zf]= colorMatchFcn('CIE_1931');  
  
XL= interp1(Lambdaf,xf,Lambda);  
YL= interp1(Lambdaf,yf,Lambda);  
ZL= interp1(Lambdaf,zf,Lambda);  
  
[R,G,B]=xyz2rgb(XL,YL,ZL);  
  
R=R'/max(R);  
G=G'/max(G);  
B=B'/max(B);
```

## Anexo 5

Lfisio\_imagenRGB.m

*Codificación para la exportación de resultados de lambda fisiológica en RGB.*

```
%-----  
% Universidad de Las Palmas de Gran Canaria  
% Trabajo de Fin de Master. Bimetic.  
% Visualizacion del Sonido. Representacion de las frecuencias sonoras  
% en el espectro Visible.  
% AUTOR: Andrea Victoria Baez Hernandez  
% TUTOR: Jose A.Rabadan Borges, Victor Guerra Yanez  
%-----  
  
%Codigo para la exportación de resultados a imagen RGB.  
  
%Para tomar los valores resultantes:  
f=440;  
a=1;  
%Valor de Lambda fisiológica  
Lambda = respfisio(f,1);  
Lambda  
  
%Codigo de "getFisioRGB.m" para convertir Lambda fisiologica en RGB.  
  
Lambda=respfisio(f,a);  
  
[Lambdaf,xf,yf,zf]= colorMatchFcn('CIE_1931');  
  
XL= interp1(Lambdaf,xf,Lambda);  
YL= interp1(Lambdaf,yf,Lambda);  
ZL= interp1(Lambdaf,zf,Lambda);  
  
[R,G,B]=xyz2rgb(XL,YL,ZL);  
  
imagen= ones(500,2000,3);  
imagen(:,:,1)=R;  
imagen(:,:,2)=G;  
imagen(:,:,3)=B;  
imshow(imagen);
```

## Anexo 6

compresion.m

*Codificación de la particularización de la ecuación de conversión fisiológica.*

```
%-----
% Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
% Trabajo de Fin de Master. Bimetic.
% Visualizacion del Sonido. Representacion de las frecuencias sonoras
% en el espectro Visible.
% AUTOR: Andrea Victoria Baez Hernandez
% TUTOR: Jose A.Rabadan Borges, Victor Guerra Yanez
%-----

%Codigo de la particularizacion de la ecuacion de conversion fisiologica

lambda = respfisio(20:5000,1);

minLambda = min(lambda);
maxLambda = max(lambda);

A = [maxLambda 1;minLambda 1];
b = [700 400]';

% Obtencion de coeficientes de la recta para hacer la conversión.
x = inv(A)*b;
a = x(1);
b = x(2);

lambda = a*lambda + b;

plot(lambda);
title('Compression of the Physiological conversion equation')
ylabel ('Wavelenght')
xlabel ('Frequency')

%Para tomar los valores resultantes:
%lambda = respfisio(440,1);
%lambda = a*lambda + b;
%lambda
```

## Anexo 7

Lpart\_imagenRGB.m

*Codificación para la exportación de resultados de lambda de la particularización en RGB.*

```
%-----
% Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
% Trabajo de Fin de Master. Bimetic.
% Visualizacion del Sonido. Representacion de las frecuencias sonoras
% en el espectro Visible.
% AUTOR: Andrea Victoria Baez Hernandez
% TUTOR: Jose A.Rabadan Borges, Victor Guerra Yanez
%-----

%Codigo para la exportación de resultados de la particularización a imagen RGB.

%Codigo de "compresion.m"
lambda = respfisio(20:5000,1);

minLambda = min(lambda);
maxLambda = max(lambda);

A = [maxLambda 1;minLambda 1];
b = [700 400]';

% Obtencion de coeficientes de la recta para hacer la conversión.
x = inv(A)*b;
a = x(1);
b = x(2);

lambda = a*lambda + b;

%Valor de lambda de la particularizacion
lambda = respfisio(f,1);
lambda = a*lambda + b;
lambda

%Codigo de "getFisioRGB.m" para convertir lambda en RGB.

[lambdaf,xf,yf,zf]= colorMatchFcn('CIE_1931');

XL= interp1(lambdaf,xf,lambda);
YL= interp1(lambdaf,yf,lambda);
ZL= interp1(lambdaf,zf,lambda);

[R,G,B]=xyz2rgb(XL,YL,ZL);

imagen= ones(500,2000,3);
imagen(:,:,1)=R;
imagen(:,:,2)=G;
imagen(:,:,3)=B;
imshow(imagen);
```

## Anexo 8

### colorMatchFcn.m

*Codificación the MathWorks. Inc. Formulario CIE 1931 para lo obtención de los valores xyz.*

```
function [lambda, xFcn, yFcn, zFcn] = colorMatchFcn(formulary)
%colorMatchFcn Popular color matching functions.
%
% [LAMBDA, XFCN, YFCN, ZFCN] = colorMatchFcn(FORMULARY) returns the
% color matching functions XFCN, YFCN, and ZFCN at each wavelength in
% the vector LAMBDA. FORMULARY is a string specifying which set of
% color matching functions to return. Supported color matching
% functions are given below:
%
% CIE_1931 CIE 1931 2-degree, XYZ
% 1931_FULL CIE 1931 2-degree, XYZ (at 1nm resolution)
% CIE_1964 CIE 1964 10-degree, XYZ
% 1964_FULL CIE 1964 10-degree, XYZ (at 1nm resolution)
% Judd CIE 1931 2-degree, XYZ modified by Judd (1951)
% Judd_Vos CIE 1931 2-degree, XYZ modified by Judd (1951) and Vos (1978)
% Stiles_2 Stiles and Burch 2-degree, RGB (1955)
% Stiles_10 Stiles and Burch 10-degree, RGB (1959)
%
% Reference: http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/cmfs.htm
%
% See also illuminant.
%
% Copyright 1993-2005 The MathWorks, Inc.

switch (lower(formulary))
case 'cie_1931'

    cmf = [360, 0.000129900000, 0.000003917000, 0.000606100000
365, 0.000232100000, 0.000006965000, 0.001086000000
370, 0.000414900000, 0.000012390000, 0.001946000000
375, 0.000741600000, 0.000022020000, 0.003486000000
380, 0.001368000000, 0.000039000000, 0.006450001000
385, 0.002236000000, 0.000064000000, 0.010549990000
390, 0.004243000000, 0.000120000000, 0.020050010000
395, 0.007650000000, 0.000217000000, 0.036210000000
400, 0.014310000000, 0.000396000000, 0.067850010000
405, 0.023190000000, 0.000640000000, 0.110200000000
410, 0.043510000000, 0.001210000000, 0.207400000000
415, 0.077630000000, 0.002180000000, 0.371300000000
420, 0.134380000000, 0.004000000000, 0.645600000000
425, 0.214770000000, 0.007300000000, 1.039050100000
430, 0.283900000000, 0.011600000000, 1.385600000000
435, 0.328500000000, 0.016840000000, 1.622960000000
440, 0.348280000000, 0.023000000000, 1.747060000000
445, 0.348060000000, 0.029800000000, 1.782600000000
450, 0.336200000000, 0.038000000000, 1.772110000000
455, 0.318700000000, 0.048000000000, 1.744100000000
460, 0.290800000000, 0.060000000000, 1.669200000000
465, 0.251100000000, 0.073900000000, 1.528100000000
470, 0.195360000000, 0.090980000000, 1.287640000000
475, 0.142100000000, 0.112600000000, 1.041900000000
480, 0.095640000000, 0.139020000000, 0.812950100000
485, 0.057950010000, 0.169300000000, 0.616200000000
490, 0.032010000000, 0.208020000000, 0.465180000000
495, 0.014700000000, 0.258600000000, 0.353300000000
500, 0.004900000000, 0.323000000000, 0.272000000000
505, 0.002400000000, 0.407300000000, 0.212300000000
510, 0.009300000000, 0.503000000000, 0.158200000000
515, 0.029100000000, 0.608200000000, 0.111700000000
520, 0.063270000000, 0.710000000000, 0.078249990000
525, 0.109600000000, 0.793200000000, 0.057250010000
530, 0.165500000000, 0.862000000000, 0.042160000000
535, 0.225749990000, 0.914850100000, 0.029840000000
540, 0.290400000000, 0.954000000000, 0.020300000000
545, 0.359700000000, 0.980300000000, 0.013400000000
550, 0.433449990000, 0.994950100000, 0.008749990000
555, 0.512050100000, 1.000000000000, 0.005749990000
```

```

560, 0.594500000000, 0.995000000000, 0.003900000000
565, 0.678400000000, 0.978600000000, 0.002749999000
570, 0.762100000000, 0.952000000000, 0.002100000000
575, 0.842500000000, 0.915400000000, 0.001800000000
580, 0.916300000000, 0.870000000000, 0.001650001000
585, 0.978600000000, 0.816300000000, 0.001400000000
590, 1.026300000000, 0.757000000000, 0.001100000000
595, 1.056700000000, 0.694900000000, 0.001000000000
600, 1.062200000000, 0.631000000000, 0.000800000000
605, 1.045600000000, 0.566800000000, 0.000600000000
610, 1.002600000000, 0.503000000000, 0.000340000000
615, 0.938400000000, 0.441200000000, 0.000240000000
620, 0.854449900000, 0.381000000000, 0.000190000000
625, 0.751400000000, 0.321000000000, 0.000100000000
630, 0.642400000000, 0.265000000000, 0.000049999990
635, 0.541900000000, 0.217000000000, 0.000030000000
640, 0.447900000000, 0.175000000000, 0.000020000000
645, 0.360800000000, 0.138200000000, 0.000010000000
650, 0.283500000000, 0.107000000000, 0.000000000000
655, 0.218700000000, 0.081600000000, 0.000000000000
660, 0.164900000000, 0.061000000000, 0.000000000000
665, 0.121200000000, 0.044580000000, 0.000000000000
670, 0.087400000000, 0.032000000000, 0.000000000000
675, 0.063600000000, 0.023200000000, 0.000000000000
680, 0.046770000000, 0.017000000000, 0.000000000000
685, 0.032900000000, 0.011920000000, 0.000000000000
690, 0.022700000000, 0.008210000000, 0.000000000000
695, 0.015840000000, 0.005723000000, 0.000000000000
700, 0.011359160000, 0.004102000000, 0.000000000000
705, 0.008110916000, 0.002929000000, 0.000000000000
710, 0.005790346000, 0.002091000000, 0.000000000000
715, 0.004109457000, 0.001484000000, 0.000000000000
720, 0.002899327000, 0.001047000000, 0.000000000000
725, 0.002049190000, 0.000740000000, 0.000000000000
730, 0.001439971000, 0.000520000000, 0.000000000000
735, 0.000999949300, 0.000361100000, 0.000000000000
740, 0.000690078600, 0.000249200000, 0.000000000000
745, 0.000476021300, 0.000171900000, 0.000000000000
750, 0.000332301100, 0.000120000000, 0.000000000000
755, 0.000234826100, 0.000084800000, 0.000000000000
760, 0.000166150500, 0.000060000000, 0.000000000000
765, 0.000117413000, 0.000042400000, 0.000000000000
770, 0.000083075270, 0.000030000000, 0.000000000000
775, 0.000058706520, 0.000021200000, 0.000000000000
780, 0.000041509940, 0.000014990000, 0.000000000000
785, 0.000029353260, 0.000010600000, 0.000000000000
790, 0.000020673830, 0.000007465700, 0.000000000000
795, 0.000014559770, 0.000005257800, 0.000000000000
800, 0.000010253980, 0.000003702900, 0.000000000000
805, 0.000007221456, 0.000002607800, 0.000000000000
810, 0.000005085868, 0.000001836600, 0.000000000000
815, 0.000003581652, 0.000001293400, 0.000000000000
820, 0.000002522525, 0.000000910930, 0.000000000000
825, 0.000001776509, 0.000000641530, 0.000000000000
830, 0.000001251141, 0.000000451810, 0.000000000000];

```

```
otherwise
```

```
error('colorMatchFcn:unrecognizedMatchFcn', ...
      'Unrecognized color match function.')
```

```
end
```

```
lambda = cmf(:, 1)';
xFcn = cmf(:, 2)';
yFcn = cmf(:, 3)';
zFcn = cmf(:, 4)';
```

## Anexo 9

### xyz2rgb.m

*Codificación the MathWorks. Inc. Para la conversión de valores xyz a RGB.*

```
function [r,g,b] = xyz2rgb(x,y,z)

M = [2.04159 -0.56501 -0.34473
     -0.96924 1.87597 0.04156
      0.01344 -0.11836 1.01517];
M = M';

RGB=[x',y',z']*M;

r=RGB(:,1);
g=RGB(:,2);
b=RGB(:,3);

% % xyz2rgb Convert CIE 1931 XYZ to RGB
% %
% %   rgb = xyz2rgb(xyz)
% %
% %   rgb = xyz2rgb(xyz,Name,Value)
% %
% %   rgb = xyz2rgb(xyz) converts CIE 1931 XYZ values to RGB values. xyz can be a P-by-3 matrix of
% %   color values (one color per row), or it can be an M-by-N-by-3 image array, or it can be an
% %   M-by-N-by-3-by-F image stack. The type of xyz can be single or double. The output has the same
% %   shape as the input. The output type is the same as the input type unless the OutputType
% %   parameter is specified.
% %
% %   rgb = xyz2rgb(xyz,Name,Value) specifies additional options with one or more Name,Value pair
% %   arguments.
% %
% %   NAME-VALUE PAIR ARGUMENTS
% %
% %   'ColorSpace' - Color space of the input RGB values.
% %                 'srgb' (default) | 'adobe-rgb-1998'
% %
% %   'WhitePoint' - Reference white point
% %                 1-by-3 vector | 'a' | 'c' | 'd50' | 'd55' | 'd65' (default) | 'icc' | 'e'
% %
% %   'OutputType' - Data type of returned RGB values
% %                 'double' | 'single' | 'uint8' | 'uint16'
% %
% %                 If OutputType is not specified, then the output type has the same type as the
% %                 input.
% %
% %
% %   Copyright 2014-2015 The MathWorks, Inc.
% % validateattributes(xyz,{'single','double'},{'real'},mfilename,'XYZ',1)
% % options = parseInputs(varargin{:});
% %
% % switch options.ColorSpace
% %   case 'adobe-rgb-1998'
% %     converter = images.color.xyzToAdobeRGBConverter(options.WhitePoint);
% %   case 'srgb'
% %     converter = images.color.xyzToSRGBConverter(options.WhitePoint);
% % end
% %
% % if isempty(options.OutputType)
% %   converter.OutputType = 'float';
% % else
% %   converter.OutputType = options.OutputType;
% % end
% %
% % rgb = converter(xyz);
% %
% % function options = parseInputs(varargin)
% % try
% % if rem(nargin,2) ~= 0
% %   error(message('images:color:invalidInput'));
% % end
% %
% % valid_options = {'ColorSpace', 'WhitePoint', 'OutputType'};
% %
% % options.ColorSpace = 'srgb';
% % options.WhitePoint = whitepoint('d65');
% % options.OutputType = '';
% %
% % for k = 1:2:nargin
% %   name = varargin{k};
% %   idx = find(strncmpi(name, valid_options, length(name)));
% %   if isempty(idx)
% %     error(message('images:color:unrecognizedParameter',name));
% %   elseif length(idx) > 1
% %     error(message('images:color:ambiguousParameter',name));
% %   else
% %     name = valid_options{idx};
% %
% %     switch name
% %       case 'ColorSpace'
% %         options.ColorSpace = validatestring(varargin{k+1},{'srgb','adobe-rgb-1998'});
% %       case 'OutputType'
% %         options.OutputType = validatestring(varargin{k+1},{'uint8','uint16','single','double'});
% %       case 'WhitePoint'
% %         options.WhitePoint = images.color.internal.checkWhitePoint(varargin{k+1});
% %     end
% %   end
% % catch e
% %   throwAsCaller(e);
% % end
```

## Anexo 10

Frecuencias de las notas del sistema temperado.

### Frequency and MIDI chart

This table shows the frequencies and MIDI numbers of the notes in the standard equal tempered scale, based on the standard A4 = 440 Hz.

	MIDI	Hz	USA	Eur		MIDI	Hz	USA	Eur
piano ↑	108	4186.01	C8	c <sup>''''</sup>	flute ↓	59	246.942	B3	
violin ↑	107	3951.07	B7			58	233.082		
	106	3729.31			┌	57	220.000	A3	
	105	3520.00	A7			56	207.652		
	104	3322.44			violin ↓	55	195.998	G3	
	103	3135.96	G7			54	184.997		
	102	2959.96			└	53	174.614	F3	
	101	2793.83	F7			52	164.814	E3	
	100	2637.02	E7		bass	51	155.563		
	99	2489.02			└ clef	50	146.832	D3	
flute ↑	98	2349.32	D7			49	138.591		
	97	2217.46				48	130.813	C3	c
	96	2093.00	C7	c <sup>''''</sup>	└	47	123.471	B2	
	95	1975.53	B6			46	116.541		
	94	1864.66				45	110.000	A2	
	93	1760.00	A6			44	103.826		
	92	1661.22			┌	43	97.9989	G2	
—	91	1567.98	G6			42	92.4986		
	90	1479.98				41	87.3071	F2	
	89	1396.91	F6		—	40	82.4069	E2	
	88	1318.51	E6			39	77.7817		
leger	87	1244.51				38	73.4162	D2	
lines	86	1174.66	D6			37	69.2957		
	85	1108.73			—	36	65.4064	C2	C
	84	1046.50	C6	c <sup>'''</sup>	leger	35	61.7354	B1	
	83	987.767	B5		lines	34	58.2705		
	82	932.328			—	33	55.0000	A1	
	81	880.000	A5			32	51.9131		
	80	830.609				31	48.9994	G1	
	79	783.991	G5			30	46.2493		
	78	739.989			—	29	43.6535	F1	
┌	77	698.456	F5			28	41.2034	E1	
	76	659.255	E5			27	38.8909		
	75	622.254				26	36.7081	D1	
└	74	587.330	D5			25	34.6478		
	73	554.365				24	32.7032	C1	C <sub>1</sub>
treble	72	523.251	C5	c <sup>''</sup>		23	30.8677	B0	
└ clef	71	493.883	B4			22	29.1352		
	70	466.164			piano ↓	21	27.5000	A0	
	69	440.000	A4			20	25.9565		
	68	415.305				19	24.4997	G0	
└	67	391.995	G4			18	23.1247		
	66	369.994				17	21.8268	F0	
	65	349.228	F4			16	20.6017	E0	
┌	64	329.628	E4			15	19.4454		
	63	311.127				14	18.3540	D0	
	62	293.665	D4			13	17.3239		
	61	277.183				12	16.3516	C0	C <sub>2</sub>
middle c	60	261.626	C4	c <sup>'</sup>		11	15.4339		