



**Universitat de les
Illes Balears**

Facultat de Ciències

Memòria del Treball de Fi de Grau

Contraste de música tonal vs música atonal: un análisis desde la perspectiva de la actividad cerebral (EEG)

Maria Ferrà Riera

Grau de Biologia

Any acadèmic 2016-17

DNI de l'alumne: 43212114J

Treball tutelat per Almudena González Brito
Departamento de Ciencias Médicas Básicas (Fisiología), ULL

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació	Autor		Tutor	
	Sí	No	Sí	No
	X		X	

Paraules clau del treball:

música académica occidental, tonalidad, atonalidad, ruido, procesamiento auditivo, actividad cerebral, EEG cuantitativo, conectividad funcional, coherencia

“Listening to classical music is known to evoke strong emotions, including feelings of pleasure. Further, this experience is often accompanied by physical responses, such as thrills, chills, shivers, and changes in heart rate that can be blocked by nalaxone, a known opioid antagonist”

Menon, V., y Levitin, D. J. (2005). The rewards of music listening: response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *Neuroimage*, 28(1), 175-184.

Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a Almudena y a Antoni que me han introducido en los pantanosos mundos de la electroencefalografía y la atonalidad. Los profesores deben de tener algo de fe y mucha visión de futuro. Gracias también a la traductora, Violeta Llorens. Y agradezco a mi madre y a mi padre cada ardid que inventaron para que no dejase las clases de piano.

Palma de Mallorca, 31 de Mayo de 2017.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen/Abstract	5
1. Características generales de la música tonal y atonal	6
1.1 Preludio	6
1.2 Música de la Edad Media	6
1.3 Música del Renacimiento	7
1.4 Música del Barroco	8
1.5 Música del Clasicismo	10
1.6 Música del Romanticismo	11
1.7 Música del siglo XX	12
2. El electroencefalograma (EEG)	15
2.1 Anotaciones previas	15
2.2 Contextualización histórica	16
2.3 Fundamentos básicos	17
3. El EEG cuantitativo en el entorno musical	17
4. Exploración de la tonalidad y la atonalidad	19
4.1 Musicología y Neurociencia	19
4.2 Procesamiento musical	20
4.3 Estado de la cuestión	21
5. Ejemplo práctico de análisis de señales	23
5.1 Introducción	23
5.2 Materiales y métodos	23
5.3 Resultados	25
5.4 Discusión y conclusiones	27
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

Resumen/Abstract

El desarrollo de la música académica occidental ha culminado en un desdoblamiento en escuelas tonales y escuelas atonales. La música tonal se encontraría principalmente representada por las corrientes musicales que llegan hasta el Romanticismo. Mientras que a partir de principios del siglo XX, surge en un clima general de movimientos de contracultura un nuevo paradigma: la música atonal. Así como la primera se construye en un marco completamente determinista, la música atonal rechaza este ideal y se basa en nuevos principios para construirse. De esta manera, música tonal y atonal resultan en estilos con características musicales muy diferentes. Ambos estilos han generado y continúan generando una serie de incógnitas que ocupan los campos de estudio de disciplinas muy diversas. Entre éstas se encontraría la Neurociencia. Una de las herramientas que ha probado ser eficaz en el estudio de estas cuestiones es el electroencefalograma (EEG), en particular la técnica del EEG cuantitativo. En las últimas décadas se han publicado gran cantidad de trabajos que analizan diferentes aspectos musicales desde el punto de vista del EEG cuantitativo. La cuestión que se plantea finalmente en el presente trabajo, es la diferencia en la conectividad funcional entre distintos estilos musicales, medida como diferencias en la coherencia espectral (COH). Los resultados obtenidos muestran diferencias significativas entre los distintos estilos musicales: en situaciones de reposo o silencio y durante la audición de música tonal, los valores de coherencia son mayores que para la audición de música atonal y ante un estímulo de ruido.

The development of Western academic music has culminated in a split of tonal schools and atonal schools. Tonal music would be mainly represented by the musical currents that existed until Romanticism. Right from the beginning of the 20th century, in a general climate of counterculture movements, a new paradigm arose: atonal music. While the first was built in a completely deterministic framework, atonal music rejects this ideal and is based on new principles. This way, tonal and atonal music result in styles characterized by very different musical features. Both styles have generated and continue generating a series of mysteries that tackle fields of study in very diverse disciplines. Among these is Neuroscience. One of the tools that has proven effective in the study of these issues is electroencephalogram (EEG), in particular the quantitative EEG technique. In the last decades a great number of works that analyze different musical aspects from the point of view of the quantitative EEG have been published. The question that finally arises in the present work is the difference between different musical styles in functional connectivity, measured as differences in spectral coherence (COH). The results obtained show significant differences between the different musical styles: in situations of rest or silence and during the hearing of tonal music, the values of coherence are greater than during the hearing of atonal music and before a stimulus of noise.

1. Características generales de la música tonal y atonal

1.1 Preludio

En la música encontramos que aún sin una intencionalidad consciente, ésta nace prístinamente estructurada, en tiempo, en intervalos, etc. ¿Por qué brota y se desarrolla con esta configuración original? ¿Y qué es lo que nos gusta tanto de escucharla? ¿Qué sentido biológico tiene la activación de centros de recompensa al realizar esta acción? Al igual que muchos de los elementos en estrecha relación con el ser humano, con la cultura o con el arte, hay ciertas preguntas para las que difícilmente encontraremos respuesta certera. Otra de las grandes incógnitas del panorama musical surge con el principio de la atonalidad. Desde 1900 emergen una serie de movimientos que fundamentan sus composiciones en la huida del sistema tonal ¿Provocan reacciones emocionales distintas a las asociadas a la música tonal? ¿Cuál es el hilo que vincula a las diversas ideas musicales? ¿Cuáles los mecanismos implicados en su procesamiento auditivo? ¿Puede ser mecanizado el proceso creativo?

En el nacimiento de todas las civilizaciones se hallan rastros de prácticas musicales (Wallin y Merker, 2001). Las civilizaciones china y mesopotámica son de hecho las primeras en descubrir la relación entre la longitud de una cuerda y la nota producida. Además, en esta región entre dos ríos, se han descrito escalas de siete notas (Michels y Mames, 1998) que incluso llegaron a ser adoptadas por la cultura griega. Así pues, de la misma manera que estos primeros asentamientos han ido fracturándose y mudando, sus tradiciones musicales inherentes han seguido también distintos cauces. Para referirse a la trayectoria musical que se habría desarrollado en el mundo occidental a lo largo del tiempo, se usa el término de “música académica occidental”. A través de la explicación y descripción de los diferentes estilos desarrollados en la música académica occidental que ahora sigue, se aprecia cómo va construyéndose el armazón que vestirán música tonal y música atonal.

1.2 Música de la Edad Media

Los inicios de la música académica occidental beben en su origen de las tradiciones judaicas, romanas y griegas, ya sea el legado en forma de tratados y estudios en este ámbito, o en forma de rituales acompañados de música. Para analizar su evolución debemos situarnos en los albores del imperio carolingio. Durante el mandato de Carlo Magno hay una intención de extender y fomentar la liturgia cristiana, que al fin y al cabo provendría principalmente de la religión judía y que llevaba largo tiempo gestándose. Esta liturgia emerge en la forma que se conoce hoy en día como canto gregoriano. Partimos pues de una música con una sola línea melódica, que además no suele moverse por encima de intervalos superiores a la quinta, en un principio sin acompañamiento instrumental y que sería cantada por voces masculinas (Hoppin, 2000). Por otro lado, en esta época el modo de dejar constancia de los cantos constituía la notación neumática. Se trata de un método en el que una serie de guiones sobre las letras, indican si la música subía o bajaba. Un poco más adelante, aparte de la altura también se intentaría indicar la amplitud de estos movimientos.

Se atribuye al monje Guido d'Arezzo (año 991) la invención del tetragrama que derivará en el pentagrama. También idea el sistema hexacordal basado en la serie *ut-re-mi-fa-sol-la-si*. Aunque esta técnica es útil como proceder didáctico para el canto llano, el invento más importante de esta época seguramente sea el sistema modal. Dicho sistema se construye sobre los modos, un modo estaba compuesto por una secuencia de ocho notas sobre la que

se construiría la melodía, que debía resolver en la nota básica del tono. Este método en modos, proviene de la tradición babilónica, y habría sido adoptada por la antigua Grecia (Michels y Mames, 1998) donde fue arduamente estudiada y difundida por el intelectual Boecio (c. 480 – 524). A partir de entonces, los cantos llanos intentarían registrarse y codificarse en función de los ocho modos posibles existentes. Otra de las implicaciones del sistema por modos es que desde el principio una melodía debía comunicar el modo en el que se movía, usando por tanto intervalos de tercera y quinta. A esto hay que añadir que en la adaptación de los cantos gregorianos existentes al nuevo sistema modal, se observa que los modos elegidos principalmente son el *portas* y el *tritus*; éstos son los más parecidos a la secuencia interválica de las actuales escalas mayores y menores. A raíz de este hecho y el anterior, vemos como van sentándose levemente las bases para la armonía que emergería unos siglos más tarde.

Entre los siglos XIII y XV también sucede un fenómeno determinante para el desarrollo música académica occidental, el nacimiento del tiempo (Jacobs, 1979). Esta vez el avance se atribuye al francés Philippe de Vitry (1291-1361) que a partir de un antiguo sistema rítmico, desarrolla una notación con cuatro elementos principalmente: la mínima (nuestra corchea), la semibreve (nuestra negra), la breve (blanca) y la larga (que será nuestra redonda). Este fenómeno ayudará al desarrollo de la polifonía. Ya en el siglo IX se registran cantos gregorianos desarrollados bajo la técnica del *organum*, en la que el conjunto de cantantes se dividía entre quienes seguían la línea del canto y quienes seguían una línea en quintas constituyendo una especie de armonía. Sin embargo, los verdaderos inicios de la armonía tendrían lugar un poco más tarde en la catedral de Notre Dame en el siglo XII (Griffiths, 2009). En la época de su construcción, se han descrito *organums* de hasta cuatro voces, con tres líneas melódicas por encima de la del canto original que seguirían uno de los seis modelos rítmicos establecidos. Estos *organums* irán evolucionando y surgirán nuevas formas como el motete, de gran relevancia para los años renacentistas siguientes.

Finalmente, el siglo XII coincide con el florecimiento de otro género musical, la tradición trobadoresca. Dicha tradición se encuentra muy ligada a la lírica y al ritmo de la métrica, trata el tema de las justas, la nobleza, las damas, y presenta diferentes formas, rondo, balada, etc (Sadie, 1980). Hasta el momento aunque suponemos debía existir, no se tenía constancia de otra tradición musical distinta a la religiosa que ejercía una especie de monopolio sobre la sociedad de la época.

Así pues, en esta época encontramos sentadas las bases para presenciar los inicios del desarrollo de la música académica occidental, de la mano de los primeros compositores como Guillaume de Machaut (1300-1377) o Landini (1325-1397), y que irá extendiéndose por toda Europa.

1.3 Música del Renacimiento

En la entrada al siglo XV el mundo medieval se encuentra en decadencia. La Iglesia Católica se halla debilitada por presiones internas, la economía padece continuas crisis debidas al improductivo sistema feudal, etc. Bajo este panorama surge el movimiento Renacentista que aboga por la vuelta a los valores de la cultura grecolatina, a lo natural; la huida de la rigidez de la religión y la mentalidad medievales. Pretende devolverse la importancia a los sentidos, al antropocentrismo frente al teocentrismo (Grout y Palisca, 1990). Esta revolución se refleja en pintura, arquitectura, música, en el arte de la época en general. Así pues, el deseo de la música ahora será representar aquella realidad tal como la perciben los sentidos.

Uno de los cambios que se produce en primer lugar, es la enorme proliferación del uso de las tríadas. Hasta el momento podíamos tropezar con terceras y quintas, pero durante el Renacimiento se explota este tipo de acorde. Este hecho nos lleva al replanteamiento de las preguntas iniciales aunque bajo otra forma, ¿nuestros oídos están predispuestos naturalmente a que nos agrade este acorde, o primero nació la tradición de este acorde y es por ello que nos gusta? ¿Por qué en general nos complace mayormente que las quintas justas por ejemplo? La respuesta muchas veces ha apuntado a que la causa de este agrado residiría en las proporciones que aparecen en una tríada (Griffiths, 2009).

Otro aspecto de gran importancia en el posterior progreso de la armonía, es la guisa en la que se desarrolla la polifonía renacentista. En primer lugar, se destaca la línea superior como línea que guiaría la melodía (que en general forma texturas mucho más suaves y menos abruptas que las medievales). A cambio las otras tres o cuatro partes normativas ejecutarían otras funciones como la de bajo armónico o el logro de tríadas plenas. También cambia la rítmica en pos de ciclos más regulares y más calmados (Atlas, 2002). Otro elemento que se introduce en esta nueva forma de polifonía es el imitativo. El motivo musical principal sería expuesto y las voces irían presentándolo de forma similar, con cierto retraso, e imitándose unas a otras.

Algunos de los compositores medievales más destacados son Dufay (1397-1474), Jean de Ockeghem (1410-1497) o Jacob Obrecht (1475-1505).

En las primeras décadas del siglo XVI puede observarse como van surgiendo estilos musicales más sencillos, enfocados a la incipiente burguesía urbana. Uno de estos nuevos géneros es el madrigal (Randel y Gago, 1997). Se trata de una canción polifónica en la que las voces emplean un contrapunto de cortas frases imitativas para expresar el texto, o sea, para simultáneamente sugerir la emoción general de la letra y para colorear ciertas frases poéticas importantes. Hablan tanto de amor y fiesta como de temáticas religiosas. Estos estilos se descantan por unas relaciones armónicas más claras, más directas, y ritmos de danza. Así pues, van predominando las estructuras basadas en lo que serán los futuros modos mayores y menores sobre la complejidad de modos y ritmos medievales.

1.4 Música del Barroco

En la segunda década del siglo XVII empieza a hacerse patente la ruptura de la uniformidad en la polifonía, que ya había empezado a descomponerse en múltiples vertientes, y que se ve atenazaba por una confrontación de valores. Por un lado se encuentran quienes apuestan por el camino racional, por la supeditación de la expresividad a las normas de la antigua armonía, como objetivo último de la música. Y por otro lado, el conjunto detractor. El mismo Monteverdi (1567-1643) defendía la posibilidad de recurrir a disonancias, alteraciones de las progresiones armónicas normales aunque pusiesen en peligro la coherencia de la polifonía armónica de mediados de siglo, para aumentar la expresividad de la pieza.

Éste será el principio de la época Barroca (siglos XVII-XVIII), que pretende expresar a través de la manifestación artística, la grandiosidad divina y las alegrías y el patetismo humanos. En este ideal de expresividad y sentimiento máximos, nace tanto en la sacra como en la profana la nueva monodia, la canción (Michels y Mames, 1998). Este género se desarrolla a través de una melodía que se hallará en la posición destacada, y otras voces que ejecutarán el soporte armónico.

El soporte armónico de la época barroca se caracteriza por el uso principal y exclusivo de tonalidades mayores y menores, pudiendo asimismo, saltar de una a otra. Por otro lado, el patrón rítmico proviene frecuentemente de los bailes. Éste funciona en cierta manera como un pulso predictivo para las personas oyentes sobre el que se construiría la armonía.

Otro rasgo característico de este periodo es la aparición y extensión del uso del bajo continuo. El acompañamiento en redes de líneas polifónicas se convirtió en una serie de anotaciones que compositor/a acotaba en función de los acordes que debían ejecutarse. La persona que los interpretaría podía hacerlo en forma de acorde, arpeggio, notas de paso, etc. Los instrumentos, normalmente instrumentos polifónicos, añadían así la parte armónica.

Bajo la influencia de estas nuevas técnicas musicales nace la ópera, con el italiano Monteverdi (1567-1643) como máximo exponente. Con ella también aparece otro elemento musical muy importante, la orquesta, aunque por el momento no actuarían como conjunto independiente sino como acompañamiento. De todos modos, sí que se iban componiendo algunas piezas para teclado bajo diversas formas. Entre éstas, invenciones polifónicas, tocatas, sonatas, etc.

Entre los años 1630 y 1680, se presenta una época muy diversa en cuanto a géneros, tradiciones, y compositores/as (Sadie, 1980). Hallamos la ópera seria de Alessandro Scarlatti (1660-1725), las sonatas de Corelli (1653-1713), la obertura francesa de Lully (1632-1687), las composiciones de Purcell (1659-1695), y un largo etcétera. Los años que suceden al 1700 ya se definen como Barroco tardío y aparece nuevamente una generación muy diversa, con personajes de la talla de Johann Sebastian Bach (1685-1715), Georg Friedrich Händel (1685-1759), el hijo de Alessandro, Domenico Scarlatti (1685-1757) y Jean-Philippe Rameau (1683-1764). Una de las características de este periodo es la base de las piezas en simetrías claras mediante la técnica repetición, reflejo o proposición, respuesta (Grout y Palisca, 1990). Este rasgo puede encontrarse en formas tan extendidas y tan distintas como el aria da capo, la fuga y el concierto.

Otro fenómeno determinante del Barroco tardío es la toma de conciencia que se observa respecto al carácter de algunos elementos. De esta manera, se describen las tonalidades menores y la de mi mayor como tristes, melancólicas; en las arias se hace uso de rítmicas pausadas. Independientemente de si estas suposiciones son acertadas o no en términos de teoría musical actual (que tampoco podríamos calificar como criterio objetivo), lo esencial es que ya empieza a asociarse específica y conscientemente el ritmo, la tonalidad o la armonía a aquello que se quiere transmitir, de una manera mucho más diáfana que en cualquier época anterior.



Figura 1. Primeros compases del prelude de “Preludio y fuga en do mayor” de J.S. Bach. Se observa como melodía y armonía, en este caso sin alteraciones, se construyen ya sobre la escala de la tonalidad de do mayor. [*Preludio y fuga en do mayor BWV 846*, J.S. Bach (1722)].

La música continua discurriendo a través de la influencia de las corrientes que se vivían, el estilo galante, el rococo, etc. En los últimos años del Barroco el panorama está predominado por la ópera y la nacida sinfonía de la batuta del compositor checo Stamitz (1717-1757), y los antiguos compositores como Bach y Händel irán quedando en segundo plano. Asimismo se estudian y quedan sentadas las relaciones entre los acordes del sistema tonal vigente. Y finalmente, también empieza a nacer otra reivindicación, la de abandonar el carácter de exhibición y lujo musical de algunas formas musicales -el aria por ejemplo- en pos de una expresividad veraz, noble.

1.5 Música del Clasicismo

Poco a poco irá conformándose un nuevo estilo musical alimentado en sus inicios por el alemán Haydn (1732-1809), y que continuará desarrollándose a través de Mozart (1756-1791) y Beethoven (1770-1827). Los pilares de este nuevo ideal subyacían en la corriente que dominaría los siglos XVIII y XIX y que denominamos Clasicismo. Se caracterizaba por la búsqueda del conocimiento y la perfección en el arte, de manera que llenase de placer y agrado al ser humano. Ésto se traduce en diferentes cambios en lo referente a la tradición musical.

En primer lugar, encontramos melodías muy cantables, con frases claramente estructuradas en pregunta-respuesta, resultando en un fraseo sumamente simétrico. Además, se acostumbra a hacer uso del cambio dominante-tónica en el cierre de éstas. Asimismo, otra innovación es el abandono del bajo continuo en pos de armonías claramente acotadas en las partituras. Estas armonías serían claras, haciendo sobretodo gran hincapié en los acordes tónica, dominante, subdominante. A la vez, se amplía el rango de modulaciones y se usan tonalidades cada vez con más alteraciones (Griffiths, 2009). La relación entre los dos elementos mencionados, líneas melódicas y armónicas, también experimenta algunos cambios. Se abandona la homofonía por la textura acompañada, donde predominaría una voz más aguda que conduce a la melodía, y que sería acompañada por el resto de instrumentos. En cuanto a la rítmica, hallamos compases claros y regulares, y frecuentemente más lentos que en el periodo Barroco (Grout y Palisca, 1990).

En general también se observa la búsqueda de fluidez constante a lo largo de toda la pieza (Michels y Mames, 1998). Por tanto, perdura la defensa barroca de la fluidez y capacidad anticipación. Algo como lo que en literatura es llamado el contrato escritor/a-lector/a, en que las personas oyentes se verían dispuestas a esperar y preparar ciertos eventos.

En esta época toma importancia la música instrumental no como simple acompañamiento vocal sino como elemento independiente. Así surgen las formas sonata, sinfonía y concierto, en la forma en que se conocen propiamente en nuestros días. Como consecuencia la orquesta se amplía, y y se explotan a fondo sus capacidades: su espectro dinámico, su alcance armónico, la articulación, etc (Griffiths, 2009).

Referente al aspecto social, la música se extiende de los entornos puramente eclesiásticos a la aristocracia y a la burguesía. Estas clases sociales compraban instrumentos, partituras e iban a la ópera, a los conciertos. Así pues, se fundan en Francia el conservatorio de música de París, y en Inglaterra la Royal Academy of Music.

Si pudiese resumirse la época del Clasicismo en unas pocas palabras, el mismo Mozart apuntó: *“las pasiones no deben expresarse nunca hasta el punto de provocar el disgusto, y la música, incluso en las situaciones más terribles, debe aún producir placer y nunca ofender al oído, es decir la música debe seguir siendo siempre música.”*

1.6 Música del Romanticismo

El Romanticismo se presenta como una época muy plural, incluso en algunas ocasiones aproximándose a lo contradictorio. La música se encuentra en el seno de una época donde se batalla contra el racionalismo, contra los estereotipos y las normas que pensaban haber llegado a encorsetar el periodo anterior (Sadie, 1980). Su estética se ase al sentimiento, a la emoción, elementos mediante los cuales intentará captar la realidad. En este periodo suceden grandes cambios y surgen nuevos géneros.

Entre estos nuevos géneros cabe destacar la música programática, que puede tomar la forma de sinfonía programática o poema sinfónico (Randel y Gago, 1997). Este concepto hace referencia a una nueva música de carácter descriptivo cuyo objetivo es evocar ideas, imágenes, escenas, y en general conceptos externos a la propia música. Por otro lado, la ópera continúa trabajándose de manera exhaustiva, alcanzando estructuras muy complejas, donde resulta difícil distinguir entre aria, recitativo, etc. Ejemplo de las magnitudes que llegaría a adquirir son los llamados dramas musicales de Wagner. Del mismo modo, las obras para orquesta también se magnifican y alcanzan enormes dimensiones. Asimismo, crece la importancia del/de la instrumentista virtuoso/a, tanto en obras para solista, como en composiciones escritas únicamente para el lucimiento de un instrumento. Este fenómeno se refleja en muchas de las composiciones de Paganini (1782-1840).

Otra vertiente que empieza a practicarse profusamente es la tradición musical nacionalista. Se observa el uso de ritmos y temas de la tradición folclórica en muchas de las obras románticas. Así lo hicieron compositores como Antonín Dvořák (1841-1904) en sus mazurkas, o Smetana (1824-1884) en las polcas, originarios ambos de Checoslovaquia que se había independizado de Austria recientemente, en el año 1918. Asimismo en Finlandia que se había separado de Rusia apenas un año antes, destaca el nombre de Jean Sibelius (1865-1957). También encontramos obras que juegan con la mezcla de “culturas musicales” dentro de una misma obra: la cultura rusa, polaca, asiática, marroquí, etc. Mezclando así tempos y patrones, como sucede en el ballet “Petrushka” de Stravinski (1882-1971).

La persecución de la música por esa expresividad máxima, desemboca en algunas innovaciones. En primer lugar, la melodía será fundamental para explotar el sentimentalismo, y experimenta grandes modificaciones dinámicas. La armonía a su vez permitirá a la melodía a alcanzar ese grado de sentimiento. En general aumenta el uso de las disonancias y va desapareciendo la recurrencia excesiva del cambio tónica-dominante, introduciéndose la variedad en subdominantes, séptimas y segundas. La línea armónica presenta a lo largo de una sola obra un gran número cambios de tonalidad y cromatismos (Sadie, 1980), rozando la atonalidad en algunos casos, que desembocarán nuevamente en un conflicto de valores a finales de la época romántica. Este fenómeno empezaría inicialmente como algo puntual, sin embargo, a medida que se sucediesen las décadas el número de compositores/as que se sumaría a esta tendencia iría acrecentándose. Liszt (1811-1886) en su “Sinfonía del Fausto” juega con un tema construido sobre las doce notas. Él mismo también hace uso frecuente de la escala octatónica en segundas mayores y menores alternadas. Por otra parte, Claude Debussy (1862-1918) también es una pieza fundamental en el desarrollo de esta mentalidad pujante. Utiliza nuevas escalas que no siguen la organización de las escalas tonales, como los tonos enteros en segundas mayores. Otro compositor que se decanta por esta segunda postura de cromatismos extremos es Erik Satie (1866-1925). En general su trabajo presenta un trasfondo muy experimental, en su “Trois gymnopedies” hace uso de algunos de los viejos modos. Tomarán este camino más adelante Arnold Schoenberg (1874-1951), con obras como “Noche transfigurada” que presenta una armonía y una forma sumamente extravagantes para el

momento. Y el joven Béla Bartok que ya desde el principio de su carrera tiende a usar escalas poco comunes o elementos del folclore para alejarse del estandarizado sistema de tonalidades. Opuesto a este conjunto, existe un segundo sector que evita la experimentalidad extrema. Entre ellos se hallan artistas de la talla de Richard Strauss (1864-1949) o Serguéi Rajmáninov (1873-1943). Bajo esta concepción, a la vez que se continúa imponiendo la lógica armónica, se hace uso de una gama amplísima de acordes y de otros recursos rítmicos que configuran una música armónicamente compleja. De este modo concluye el Romanticismo, con una patente segmentación musical entre conjuntos conservadores y libertarios.

1.7 Música del siglo XX

Adentrarse en los años que siguen al Romanticismo es una ardua tarea de clasificación y organización. La evolución unidireccional desaparece, las líneas de conexión se vuelven difusas; autores/as, corrientes y fechas se entremezclan componiendo la madeja musical que conformarán la música modernista y la música académica contemporánea desde finales de siglo XIX hasta y durante los siglos XX y XXI.

Los inicios de este periodo están marcados por dejes del movimiento post romántico y el movimiento impresionista. El primero continuaría con la tradición sinfónica, elevar la expresión musical y los sentimientos al límite. Además, con frecuencia tiende a relacionarse la idea musical con las consignas filosóficas de la época. Ejemplo de ello son las obras de Mahler, que coincidiría en sus composiciones con el pesimismo de Schopenhauer. Por otro lado, encontramos la corriente impresionista con personajes como Claude Debussy o Maurice Ravel (Randel y Gago, 1997). En la música impresionista destaca el carácter experimental de las obras: se reinventan los modos clásicos, se juega continuamente con los aspectos tímbricos... Así queda reflejado por ejemplo en la composición para piano "Jeux d'eau" de Ravel.

Podríamos señalar el periodo entre los años 1905-1910 y a los compositores Schönberg (1874-1951) y Stravinski (1882-1971) como el verdadero comienzo de la tradición modernista y contemporánea. Schönberg, originario de Austria, habría creado en sus primeras obras una música post romántica que empezaba a aparecer ya sumamente recargada de cromatismos. Así expresaba en una de sus cartas: *"es imposible que una persona experimente sólo una sensación a la vez. Uno pasa por miles simultáneamente. Y este abigarramiento, esta multiplicidad, esta falta de lógica que demuestran nuestros sentidos, producida por algún tipo de torrente desbordado de sangre, por alguna reacción de los sentidos o los nervios, esto mismo es lo que deseo tener en mi música."* Y añadía, *"la armonía es expresión y nada más."* A su parecer, para expresar la complejidad de la experiencia, de la vida misma, la armonía debía ser también compleja, y la forma musical debía basarse en una constante evolución, sin repetición de temas o patrones métricos coherentes. A él se atribuye el nacimiento del dodecafonismo o serialismo, la que podría considerarse la primera línea a incidir en lo referente a la trayectoria musical modernista y contemporánea. El principio de este movimiento se basa en la creación musical mediante series de 12 notas sin repetición de ninguna de ellas (Sadie, 1980). De igual modo, la duración de las notas es de libre elección. Si dos ocurrencias de la misma nota se dan muy cerca una de la otra, podemos hacer que una nota adquiera mayor prominencia que el resto. Bajo estas premisas, encontramos posteriormente diferentes versiones dodecafónicas o serialistas de acuerdo a la manera en que cada autor/a las asimilase y aplicase. Los principales discípulos de Schönberg serían los vieneses Alban Berg (1885-1935) y Anton von Webern (1883-1945).

LYRISCHE SUITE

I

Allegretto gioviale Alban Berg
(1885-1935)

Alle Rechte vorbehalten
All rights reserved

1. Geige
2. Geige
Bratsche
Violoncello

Figura 2. Exposición de la serie del primer movimiento de la Suite Lírica. Se observa como la voz del primer violín (1. Geige) introduce en el compás segundo las doce notas que conformarán esta serie, 5 4 0 9 7 2 8 1 3 6 10 11. [Suite lírica, Berg A. (1925-1926)].

Durante estos años, asimismo seguimos encontrando personajes que continúan la tradición musical romántica, como Serguéi Rajmáninov (1873-1943) o Richard Strauss (1864-1949), y que presentan sus obras dentro de un mundo tonal que en los años venideros irá debilitándose (Morgan, 1994).

En 1910 entra en escena Stravinsky que en su primer periodo como compositor muestra un estilo musical dentro de la corriente artística denominada “primitivismo”. Así pues, en sus primeras composiciones es palpable la tradición folclórica y el nacionalismo rusos. Ejemplo de ello es el tercero de sus ballets, “La consagración de la primavera”. Pero aquello verdaderamente fundamental, radica en que sus obras presentan elementos innovadores y revolucionarios como no se habían visto hasta el momento. Entre estos elementos se cuenta la armonía politonal o los ritmos abruptos que van apareciendo a lo largo del desarrollo de sus obras.

De modo sintético podríamos decir que la diferencia entre los dos autores que iniciaron el cambio que sucedería, es que Schönberg se habría acercado a la atonalidad desde sus primeros principios, alcanzándola por completo en su obra “Pierrot Lunaire”. Además, pronto se valdría de la técnica del serialismo para desarrollar sus obras en el marco atonal. Sin embargo, Stravinsky desde el inicio presenta elementos revolucionarios pero no sería hasta sus últimos años cuando adoptaría el serialismo propiamente como método compositivo. Por otro lado, ambos autores coinciden en que sentarán las bases para el desarrollo de la atonalidad.

En estos mismos años iniciales, cabe destacar también a otros personajes que facilitan la conformación del concepto atonal. El americano Charles Ives (1874-1954) empezará a desarrollar un estilo propio, innovador y diferente: polirritmia y politonalidad se encuentran presentes, y desarrollará y se acogerá a la música microtonal en sus obras. En 1913 de entre el acervo del futurismo, aparece el italiano Luigi Russolo (1885-1947) que utiliza en sus composiciones ruidos producidos por motores, silbatos, ruedas... De este modo, Russolo se considera el precedente técnico y estético de lo que más tarde se conocerá como música concreta. El ejemplo quizás más famoso de este estilo es “El despertar de una

ciudad". Finalmente, Henry Cowell desarrollará la técnica armónica de los clusters (Morgan, 1994), y coinventará el ritmicón, un instrumento electrónico que permite la reproducción de ritmos predeterminados altamente complejos.

También cabe destacar en el año 1922 el nacimiento de la ISCM (International Society for Contemporary Music) que junto con otras entidades que serán fundadas más adelante, como el IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique), pretenden fomentar y potenciar la emergente música contemporánea.

Los años que seguirán a la Primera Guerra Mundial parecen llenarse de un silencio general en el ámbito de la música. Además del sentimiento generalizado de abatimiento social, nos encontramos que ya no existe una unidad en el lenguaje armónico y la expresión musical, que están a medias entre el Romanticismo y lo modernista (Griffiths, 2009). Este silencio, el encontrar pocas obras destacables, afecta tanto a compositores/as tonales como atonales. Muy frecuentemente la solución será recurrir a ideas y motivos del pasado, de la época de Bach o Händel por ejemplo (Sadie, 1980). Así es como nace el Neoclasicismo. Éste será imprescindible para reanimar la actividad compositiva tanto de la vieja generación (como Ravel, Stravinsky o Bártok) así como de la nueva: Arthur Honneger (1892-1955), o Paul Hindemith (1895-1963). Este movimiento nos regala obras maestras como "Matías el pintor" de Hindemith, o el "Concierto para piano e instrumentos de viento" de Stravinsky.

En los años veinte es también inevitable hacer mención a un nuevo estilo musical que tendría mucha importancia en adelante y que presentaría una acogida inmediata, el jazz. Se extiende desde Estados Unidos por toda Europa, a excepción de la Unión Soviética donde era visto como una amenaza del capitalismo. A partir de ese momento también en algunas las piezas académicas encontraremos elementos del jazz, como queda patente en el "Concierto para piano en sol mayor" de Ravel, compuesto entre 1929 y 1931 (McLeish, McLeish, Reverter y Adrián, 2000).

La década que seguiría, los años treinta, estaría marcada por el auge de los regímenes totalitarios, que esgrimían la música como una herramienta para la unificación y la homogeneidad de las naciones. Así muchos compositores/as de Italia, Alemania y la Unión Soviética, se ven forzados a exiliarse a América, París e Inglaterra; o a someterse a los cánones que dictaban los fascismos. En la primera situación se encontrarían Schönberg o Hindemith, mientras que Strauss o Shostakovich pertenecerían al segundo grupo.

En los años cuarenta y cincuenta, después de la segunda guerra mundial, se precipita un nuevo conjunto de innovaciones drásticas en el panorama musical. Y aparece una nueva generación que reclama nuevos y mayores cambios (Morgan, 1994). Esta generación comprende a autores como Olivier Messianen (1908-1992), Pierre Boulez (1925-2016) o Luciano Berio (1925-2003). Asimismo, empezarán a registrarse nuevas técnicas de ejecución que se indicarán en las partituras: pulsar las cuerdas en el piano, modificar su sonido con madera o goma; tocar sonidos extremadamente agudos en los instrumentos de viento, etc. De esta época cabe destacar el serialismo integral, en el que a diferencia del dodecafonismo, se establece un orden no sólo para la sucesión de las diferentes alturas, pero también para las duraciones y la sucesión dinámica (Randel y Gago, 1997). Puede apreciarse esta técnica por ejemplo en la obra "Estructuras I" de Boulez. Otra corriente que será ampliamente adoptada (Boulez, Messianen, Karlheinz Stockhausen (1928-2007)) es la creada por el francés Pierre Schaeffer (1910-1995): la música concreta. En ésta se registraban el sonido sobre una cinta, o un CD posteriormente, y de esta manera podía experimentarse de un modo completamente nuevo y diferente, cortando, superponiendo y combinándolo en un nuevo sonido (Griffiths, 2009). En las últimas décadas y siguiendo este concepto encontramos la música electrónica (donde el sonido era creado directamente en el "laboratorio") y la electroacústica (una especie de síntesis de ambas). Asimismo, surge otra

corriente de la mano del estadounidense John Cage (1912-1992): la música indeterminada, cuyos principios se basan en dejar algún elemento abierto a la decisión de la persona que lo interpreta. En estrecha relación con esta corriente se encuentra la llamada música aleatoria. En esta disciplina, se disponen una serie de células musicales pautadas. A partir de su reordenación y reaparición se conforma en la obra una especie de estructura general (Morgan, 1994). Sin embargo, en el proceso musical de esta corriente predominaría el componente del azar. Dentro de cada una de estas secciones, deben tomarse -en mayor o menor medida- una serie de decisiones a medida que la obra avanza, basadas en la improvisación. Destacan nuevamente el compositor John Cage y otros nombres, como el del argentino Mauricio Raúl Kagel (1931-2008). También en esta época encontramos la música estocástica que utiliza procesos matemáticos y físicos como método compositivo, y cuyo principal exponente sería Iannis Xenakis (1922-2001). Una obra prototípica de este fenómeno puede ser su “Diamorphoses”, en la que Xenakis se vale de la mecánica estadística de gases para componerla (Griffiths, 2009). Otra corriente que se desarrolla en esta etapa es la música minimalista. Ésta consiste en la utilización de frases sencillas y cortas que van repitiéndose en variaciones mínimas a lo largo de la obra. También destaca el uso casi exclusivo de armonías tonales. La evolución de esta música a lo largo de los años ha resultado en un abigarrado conjunto voces musicales. Entre otros podemos encontrar a Steve Reich (1936), Philip Glass (1937) o Michael Nyman (1944). De este modo, seguiría un extenso etcétera de corrientes.

A partir de mediados de los sesenta, se suele hablar de “música académica contemporánea” propiamente, dándose por finalizada la época modernista. Encontramos también un gran número de corrientes nuevas. El poliestilismo por ejemplo, consiste en la fusión de múltiples estilos o técnicas musicales. A este estilo se acogen compositores como Alfred Schnittke (1934-1998) o Peter Maxwell Davies (1934-2016). La obra “St Thomas Wake” de éste último puede considerarse un paradigma de poliestilismo. Por otro lado, también surgen otros movimientos, como la llamada Nueva Simplicidad. Se extenderá desde Alemania y cuenta con compositores como Astor Piazzolla (1921-1992) o Arvo Pärt (1935). Esta corriente practica una vuelta a la tonalidad y a las formaciones musicales tradicionales. A través del estudio de la naturaleza del timbre nace el espectralismo, que juega con la descomposición del espectro armónico de los sonidos. Este movimiento se origina en Francia de la mano de artistas como Tristan Murail (1947) y va extendiéndose a otros/as: Sofia Gubaidulina (1931), Julian Anderson (1967), etc. Del mismo modo que en el modernismo musical, en la música académica contemporánea, podemos enumerar un largo etc de corrientes.

2. El electroencefalograma (EEG)

2.1 Anotaciones previas

Las cuestiones que se han ido planteando entorno a la música tonal y atonal, se encuentran sumergidas en un debate musical a gran escala, en el que participan disciplinas muy heterogéneas, como la musicología y la neurociencia. Ésta última y en concreto el estudio de la actividad cerebral, pueden colaborar de manera importante en la comprensión del proceso musical. Para dicho estudio, una técnica ampliamente utilizada es el electroencefalograma (EEG). Por sus características, las cuales veremos a continuación, se justifica su elección en este trabajo.

2.2 Contextualización histórica

Los comienzos de la electroencefalografía se presentan en una forma sencilla, como un sólo electrodo unipolar desnudo. Sin embargo suponen una base indispensable para el futuro desarrollo de la Neurociencia y los campos que comprende; tanto en el estudio de enfermedades neurológicas, como en el trabajoso desenmarañar de la complejidad del cerebro. Ya existían algunas técnicas anteriores como la craneoscopia o la electroestimulación practicadas con iguales fines. Asimismo, también se habían construido teorías previas como las del científico Emil Du Bois-Reymond (1818-1896), que postulaban el funcionamiento eléctrico de la fisiología del sistema nervioso.

En el año 1875 el británico Richard Caton (1842-1926) mediante el uso de un electrodos unipolares y un galvanómetro de espejo, presenta los primeros resultados que defienden la existencia de diferencias eléctricas entre puntos del córtex. Realizó los experimentos sobre los cráneos desnudos, la superficie externa y la materia gris de conejos, monos y gatos (Collura, 1993). En los años siguientes la investigación de esta materia se centró en Europa del Este principalmente. Allí encontramos los nombres de Vasily Yakovlevich Danilevsky (1852-1939) o Adolf Beck (1863-1939). Cabe destacar al científico Vladimir Pravdich-Neminsky (1879-1952) establecido en la Unión Soviética. En 1920 presentó la primera demostración gráfica de las señales electroencefalográficas que él mismo acuñó en ese momento como “electrocerebrograma” (Niedermeyer y da Silva, 2005). Cuatro años más tarde el alemán Hans Berger (1873-1941), realiza el primer registro sobre humanos valiéndose de un galvanómetro de cuerda, y lo ya define como electroencefalograma (Teplan, 2002). Además, define dos patrones de oscilación de la actividad eléctrica, y los bautiza como ondas alfa y beta. Más tarde, en 1930, estos hallazgos tendrían lugar asimismo en América (Collura, 1993) de la mano de Davis Hallowell (1896-1992) o Frederic y Erna Gibbs (1903-1992, 1904-1987). Así pues, la electroencefalografía se encontraría bien establecida por entonces en Europa y Estados Unidos.

En la siguiente década, esta técnica sería clave en el desarrollo del estudio y diagnóstico de la epileptología, así como en estudios de sueño y neurocirugía. En 1947 se fundaría la “American Electroencephalographic Society” y en el 1949 empezaría a publicarse la revista “The EEG Journal”. En los años 50 a 70, con el inicio de la Revolución Digital, se posibilitó la evaluación y cuantificación de parámetros electroencefalográficos imposibles de llevar a cabo mediante el mero análisis visual de las ondas. Así es como nace el actual EEG cuantitativo (Evans y Abarbanel, 1999). El camino hasta nuestra época, consiste en el desarrollo progresivo de nuevos aparatos y nuevos modelos con mejoras y más prestaciones.

Las primeras aplicaciones de esta técnica en el estudio de las respuestas eléctricas a los fenómenos musicales se datan en los años 50. Por ejemplo, en 1954 el francés Robert Francès (1919-2012) realizó electroencefalogramas y midió la respuesta galvánica de la piel, el ritmo cardíaco y la frecuencia respiratoria en individuos que escuchaban fragmentos musicales (Francès, 1954). Así pues, en estos años se manifestaría ya la necesidad de averiguar el mecanismo cerebral subyacente en la percepción musical.

2.3 Fundamentos básicos

La electroencefalografía consiste en la monitorización y el seguimiento -por medio de electrodos- del campo electromagnético cerebral que generan las neuronas, y que resulta alterado en la actividad de las mismas (Buzsáki, Anastassiou y Koch, 2012). Como modelo simplificado podríamos presentar el siguiente proceso: la llegada de un impulso nervioso excitatorio a la neurona provocaría la apertura de los canales de sodio (Niedermeyer y da Silva, 2005). El desplazamiento de sodio hacia el interior de la célula, que actuaría como sumidero de cargas positivas, crearía un espacio de polaridad negativa en el medio extracelular. A la vez, en otro punto de la neurona se produciría una corriente pasiva de cargas positivas hacia el exterior celular (da Silva, 2009), resultando en un potencial extracelular positivo. Así, entre ambos puntos se establecería un dipolo eléctrico (Williamson, Romani, Kaufman y Moderna, 2013). Por un lado, el campo generado por una sola neurona es demasiado pequeño como para ser detectado mediante EEG. Y por otro lado, esta técnica suele practicarse de forma no invasiva, es decir, situando los electrodos a nivel cortical; de esta manera la distancia del electrodo a la fuente de la oscilación eléctrica es relativamente elevada. Sin embargo, gracias a la singular actividad y disposición de las neuronas piramidales, localizadas a nivel de la capa V cortical, es posible realizar registros eléctricos del estado cerebral. Éstas se caracterizan por la sumación de su acción en el tiempo ya que descargan de manera sincronizada; y en el espacio, debido a su alineación en paralelo. Así pues, aquello que registra el EEG cortical es principalmente la actividad del conjunto de neuronas piramidales.

Este fue el mecanismo general que se planteó para el funcionamiento del EEG inicialmente, y han ido surgiendo conjuntos de detractores/as y defensores/as. El funcionamiento y la relación entre la actividad eléctrica cerebral y el registro encefalográfico continúa aún en estudio, los modelos se reformulan y se plantean nuevas teorías (Avitan, Teicher y Abeles, 2009).

Ciertos de los impulsos eléctricos corticales se generan de manera rítmica en respuesta a órdenes talámicas. Estos ritmos se generan en patrones en los que podemos caracterizar ondas de morfología, duración o frecuencia propias. Se han definido cuatro tipos de ondas principales: la banda delta (0.1-4 Hz), la banda theta (4-8 Hz), la banda alfa (8- 13 Hz), la banda beta (14- 30 Hz) y la banda gamma (>30 Hz) (Teplan, 2002).

El procedimiento para llevar a cabo la técnica EEG consiste en primer lugar, en la disposición de una serie de electrodos, que pueden variar en número y localización. Cada uno de estos electrodos conforma un canal y, registra una señal eléctrica que será amplificada. Existen diferentes técnicas y tecnologías que posibilitan la transformación de estas señales, y por tanto, la presentación de los resultados puede tomar diferentes matices. Pero en general, éstas comparten en común que permiten hacernos una idea y determinar cuáles son aquellas áreas corticales activadas en cada momento y a una escala temporal muy precisa, de hasta milisegundos. De esta manera puede llevarse a cabo un seguimiento de la evolución de la actividad cerebral en las condiciones experimentales establecidas.

3. El EEG cuantitativo en el entorno musical

La técnica del EEG cuantitativo permite una interpretación objetiva y precisa de los datos de actividad eléctrica cerebral. El desarrollo de dicha metodología es inconcebible sin la posibilidad del procesamiento digital de los datos. Otro de los elementos pilares en el EEG cuantitativo es el desarrollo del algoritmo de cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT). La aplicación de la FFT permite determinar qué proporción de la potencia del registro

corresponde a cada banda. Este cálculo permite a su vez el desarrollo de una serie de medidas del EEG en el dominio de las frecuencias. Generalmente, los estudios en el ámbito musical se mueven en este dominio (Petsche, Richter, Von Stein, Etlinger y Filz, 1993). De esta manera, se definen una serie de medidas nuevas -como la PSD, el espectro de potencias, etc- que proporcionan una profundidad inédita a los estudios de Neurología; y que llegan hasta el ámbito musical (Auzou, Eustache, Etevenon, Platel, Rioux, Lambert y Baron, 1995; Kabuto, Kageyama y Nitta, 1993; Pavlygina, Sakharov y Davydov, 2004; Sammler, Grigutsch, Fritz y Koelsch, 2007; Schaefer, Vlek y Desain, 2011; Yuan, Liu, Li, Wang y Liu, 2000). Exponemos por ejemplo el estudio de Yuan *et al.* (2000), en el que se comparó la actividad cerebral de estímulos de ruido frente a estímulos musicales. Los resultados que se obtuvieron mostraban que la actividad de la banda theta incrementaba significativamente con el segundo tipo de estímulo, mientras que alfa 2 decrecía de manera significativa. En el año 2007, otro estudio encontró que la música agradable en contraste con la música desagradable -asociadas a estímulos consonantes y disonantes respectivamente- incrementaría la banda theta de la línea media prefrontal (Sammler *et al.*, 2007).

Para la ejecución de procesos sensoriales y cognitivos, tales como la acción musical, se acepta en Neurociencia, la existencia de conexiones recíprocas entre diversas áreas del cerebro que interactúan entre sí. Este hecho otorga también una nueva dimensión a la cuestión neuromusical. Se establece así que en dichas áreas debería hallarse una interdependencia estadística entre las señales de los canales de EEG implicados. Para evaluar esta interdependencia han aparecido medidas muy diferentes, contándose entre las iniciales, el análisis clásico de la correlación cruzada y el análisis de la coherencia.

Ésta última representa una de las medidas más probadas y extendidas (Busk y Galbraith, 1975; French y Beaumont, 1984; Gardner, 1992; Nunez, 1997). La coherencia es una medida de la correlación lineal entre dos señales, y suele calcularse para cada una de las bandas típicas. Los valores que puede tomar varían de 0 a 1. Encontramos que valores cercanos a 1 indicarían la existencia de una alta correlación de la actividad entre los canales de EEG implicados -y por tanto entre las áreas cerebrales asociadas- y a la inversa (González, 2016). Ambos extremos, 0 y 1, presentan un valor funcional. En la investigación musical se ha hecho un uso extenso de esta medida, a niveles de conectividad tanto inter-como intrahemisférica (Iwaki, Hayashi y Hori, 1997; Passynkova, Neubauer y Scheich, 2007; Peterson y Thaut, 2007; Petsche, 1996; Petsche y Etlinger, 1998; Petsche, Linder, Rappelsberger y Gruber, 1988; Sakharov, Davydov y Pavlygina, 2005). En uno de los experimentos citados, consiguieron identificarse dos regiones de conectividad interhemisférica en la banda theta. La primera se situaría en la región anterior y sería sensible a los fenómenos de consonancia; y la segunda se localizaría en la región posterior y presentaría sensibilidad a estímulos disonantes (Passynkova *et al.*, 2007). Asimismo, en el contraste entre consonancia y disonancia, se habría registrado una mayor conectividad intrahemisférica a nivel del hemisferio derecho. Este hallazgo se correlacionaba con las puntuaciones del estímulo como agradables, y por ello, se relacionó este hemisferio con el factor emocional. Petsche y Etlinger (1998) concluyeron algunos hallazgos igualmente interesantes a partir del análisis de la medida de la coherencia. En su experimento llevado a cabo para diferentes estilos musicales, observaron incrementos en la coherencia de la banda theta en la mitad anterior del cerebro durante la escucha de música barroca y clásica. Durante la escucha de obras de Schönberg por otro lado, este incremento de coherencia se extendió a regiones posteriores.

La integración funcional supuesta para todo acto cognitivo también ha resultado ser exitosamente registrada a través de otra medida: la sincronía de fase (Damasio, 1990;

Friston, Stephan y Frackowiak, 1997; Varela, Lachaux, Rodriguez y Martinerie, 2001). Este parámetro expresa la correlación temporal entre las señales EEG que generan en una determinada banda de frecuencia (González, 2016). De esta manera el grado de sincronía reflejaría la uniformidad entre incrementos y decrementos en el patrón oscilatorio de las señales EEG, y la cercanía con que se producirían estas oscilaciones en el tiempo. Actualmente, existe una gran variedad de métodos para el cálculo de dicha sincronía (Kraskov, Kreuz, Quiroga, Grassberger, Mormann, Andrzejak y Lehnertz, 2002; Lachaux, Rodriguez, Martinerie y Varela, 1999; Schack y Weiss, 2005). En referencia a su aplicación en el ámbito musical, cabe destacar las observaciones de los estudios de Bhattacharya y Petsche (2001). Sus resultados mostraban una mayor sincronía en la banda gamma durante la audición de una pieza musical en contraste con las condiciones de reposo. Otro estudio de interés, concluía que ante incongruencias sintácticas musicales, se producía una desincronización en la banda alfa (Ruiz, Koelsch y Bhattacharya, 2009).

En los últimos años, se han desarrollado otras fórmulas de análisis del EEG cuantitativo. Un ejemplo es la medida de sincronización no-lineal, que se construiría sobre complejos algoritmos.

Finalmente, cabe destacar otra manera de presentar los resultados del análisis matemático en el marco del EEG cuantitativo: mediante la síntesis de imágenes cartografiadas que permiten la representación visual de los resultados (Llobera, Rial y Darde, 1995). Estas técnicas consisten en la elaboración de mapas topográficos del cerebro. En dichas cartografías se representa por banda de frecuencia y por electrodo, el grado de la variable considerada en un espectro de colores. Las variables podrían consistir en las densidades de frecuencia en el dominio de las frecuencias, hasta medidas de tensión instantánea en el dominio del tiempo (Llobera *et al.*, 1995). Además, gracias a los avances tecnológicos actuales, es posible interpolar también los colores de las transiciones entre electrodos.

4. Exploración de la tonalidad y la atonalidad

4.1 Musicología y Neurociencia

La música aparece como un fenómeno presente en todas las culturas (Miller, 2000). Entorno a este hecho surgen dos posicionamientos principales. El primero defiende la música como un puro constructo de la cultura y por otro lado, la segunda postura, establece la música como un fenómeno natural de carácter innato. En este marco de debate se presentan también otras cuestiones ¿Cumple o no alguna función, ya sea biológica o cultural? Como función biológica suele ponerse por ejemplo el canto de nanas (Peretz y Zatorre, 2003); y como ejemplificación para el segundo caso, podría servir cualquier celebración o evento social acompañado por música. Y todavía podemos aventurarnos más lejos, ¿es registrada en unas estructuras neuronales específicas o se vale de estructuras destinadas a otras funciones para procesarse? Estas cuestiones se plantean muchas veces de manera absolutamente dicotómica, pero quizás las respuestas sean un intermedio entre ambos extremos.

La convergencia entre música y Neurociencia se refracta en mil perspectivas. Los estudios realizados hasta la fecha son muchos y se dan aproximaciones a la materia desde puntos muy diferentes: emociones evocadas, la imaginería musical, enfoques cognitivos, características diferenciales entre músicos/as y no músicos/as, etc. En primer lugar se presentarán algunos conocimientos básicos que posteriormente, pueden servir de guía en la interpretación de la segunda parte. En ésta, se expondrán las ideas propiamente enmarcadas en el ámbito de las diferencias entre música tonal respecto música atonal.

4.2 Procesamiento musical

El proceso de percepción musical comprende a su vez una extensa multiplicidad de procesamientos: el análisis de altura y ritmo, en la música occidental la extracción de las estructuras específicas de la jerarquía tonal, las emociones y el significado implicados, y la interacción de estos elementos con la memoria (McDermott y Hauser, 2005).

El sonido se transforma a nivel auricular en una señal eléctrica que viajará hasta el cerebro. Se ha propuesto que en el trayecto hasta la corteza, diferentes propiedades como la localización, la intensidad, el tiempo, etc, se separan y se van preprocesando en diferentes áreas. Finalmente, en la corteza auditiva primaria del lóbulo temporal -el destino principal- volverían a ensamblarse estas propiedades, y se llevarían a cabo análisis de mayor grado en la escala jerárquica, como el procesamiento de la interacción entre altura y ritmo (Miranda, 2010).

La altura es una de las principales propiedades del sonido, nos permite clasificar los sonidos como más graves o más agudos de acuerdo a la frecuencia que presentan. En la música occidental, podríamos decir que a la altura le corresponde el papel principal. Además, es el único elemento en el que existe un consenso más o menos general respecto a las áreas implicadas en su procesamiento. Se relaciona principalmente con el córtex auditivo del hemisferio derecho (Zatorre, 1988). A su vez, la percepción del contorno de la melodía -las subidas y bajadas en la altura- también se relacionan con el lóbulo temporal derecho (Zatorre, 1985). Se ha postulado asimismo, que la corteza auditiva derecha presentaría una organización tonoscópica. Es decir, estaría dispuesta de manera que las frecuencias bajas se representarían en los laterales y las elevadas en la región central (Wessinger, Buonocore, Kussmaul y Mangun, 1997). Por otro lado, el giro frontal inferior ha sido relacionado con la memoria de trabajo para la altura (Zatorre, Evans y Meyer, 1994). Esta área se ha relacionado también con la percepción de las alteraciones en el curso de la armonía. Otros estudios señalan también que alteraciones en la armonía activan el área de Broca (Koelsch y Mulder, 2002), muy relacionada con el lenguaje y las alteraciones sintácticas. Se ha propuesto así un solapamiento entre lenguaje y música (Levitin y Menon, 2003; Patel, 2003). La propiedad tímbrica se ha asociado asimismo con las áreas temporales auditivas de hemisferio derecho (Samson y Zatorre, 1994).

Por otro lado, el hemisferio izquierdo se ha asociado mayormente a la propiedad rítmica, la organización de los eventos en el tiempo, su duración, etc. En estudios recientes se ha señalado también la participación en la percepción rítmica del cerebelo (Penhune y Doyon, 2002), los ganglios basales (Rao, Harrington, Haaland, Bobholz, Cox y Binder, 1997; Rao, Mayer y Harrington, 2001), y ciertas áreas corticales motoras (Halsband, Ito, Tanji y Freund, 1993).

De esta manera, el modelo propuesto postula que el hemisferio derecho e izquierdo realizan funciones tan complementarias con tal de optimizar la resolución de ambos fenómenos: el frecuencial y el temporal (Zatorre, Belin y Penhune, 2002). Una elevada resolución no sería posible en ambos hemisferios, y se propone que la corteza auditiva derecha se habría especializado y optimizado la resolución del espectro de frecuencias del sonido; y la izquierda, la resolución temporal del sonido. Esta suposición es asimismo apoyada por estudios que demuestran que lesiones que resultan afectar a la discriminación de la altura, no tienen repercusión en la percepción del tiempo (Ayotte, Peretz, Rousseau, Bard, y Bojanowski, 2000; Liégeois-Chauvel, Peretz, Babai, Laguitton y Chauvel, 1998; Piccirilli, Sciarra y Luzzi, 2000; Peretz, 1990; Peretz y Kolinsky, 1993; Vignolo, 2003), y a la inversa (Pietro, Laganaro, Leeman y Schnider, 2004; Peretz, 1990).

4.3 Estado de la cuestión

En 1988, Francès Aboud (1988) realizó un experimento en el que incluía un grupo de músicos/as familiarizados con la música atonal y otro que no lo estaba. Mostró que ambos conjuntos presentaban muchas dificultades para identificar variaciones hechas sobre una serie de doce notas, especialmente si éstas se encontraban imbuidas en un contexto musical. Por otro lado, Krumhansl, Sandell y Sergeant (1987) un año antes, concluyeron que las estructuras construidas sobre doce notas sí que podían resultar un poco más transparentes para oyentes musicalmente entrenados/as en la música atonal. La música atonal permanece siendo un estilo musical muy restringido o abandonado a ciertos ámbitos musicales. Hay quienes atribuyen esta incomprensión a fenómenos biológicos, y otros que la atribuyen a la poca difusión que se hace de ella y a la dificultad que posee este estilo. El mismo Schoenberg (1984) sostiene que con una exposición suficiente, la música atonal podría pasar a ser tan apreciada como la tonal.

En el ámbito neurocognitivo el estudio de los posibles paralelismos y diferencias entre música tonal y música atonal, lleva ya varias décadas en desarrollo. Se han planteado una serie de teorías que analizan las diferencias estructurales y de estabilidad de ambas. Asimismo, también se ha estudiado su relación desde el punto de vista del equilibrio entre la consonancia y la disonancia, y las emociones que éstas generan.

Podríamos estipular que el armazón de la música tonal lo conforma la premisa de la tonalidad. Ésta da origen a una jerarquía y estructura implícitas, y a un sistema de tensión-relajación y generación de expectativas que tanto músicos/as como no músicos/as infieren (Tillman y Bigand, 2004). Por ejemplo, en el estudio llevado a cabo en 2006 por Brattico, Tervaniemi, Näätänen y Peretz (2006) se concluyó que, aún sin prestar atención, el incumplimiento de ciertas expectativas tonales era igualmente identificado. Éstas se reflejaban como una temprana negatividad frontal en la señal ERP. Todos estos supuestos se recogen en la llamada "Generative Theory of Tonal Music". De este modo, la jerarquía y la estructura de la música tonal se verían influidas por una serie de eventos determinados, entre ellos: si se encuentra en una posición métrica débil o fuerte, si es paralelo a algún evento previo, la intensidad sonora del mismo, etc.

El intento de tratar de transportar este enfoque desde la música tonal a la música atonal lleva varios años en estudio. Por un lado, Ockelford y Sergeant (2013) en su "Zygonic Model", proponen que oyentes familiarizados/as con este estilo musical pueden llegar a identificar lo que llaman dos tipos de "antiestructura": tanto la falta de repetición, como la evitación de ciertos tonos que darían la sensación de tonalidad. Lerdahl (1989) por su parte, propone que en ausencia de las condiciones de estabilidad que otorga la organización tonal -la situación de la música atonal- ésta se organizará principalmente en base a la prominencia de ciertas notas. Esta teoría explicaría cómo oyentes de nivel experto son capaces de en cierta medida crear esquemas para la comprensión musical de este estilo. Estos supuestos se recogen en la llamada "Atonal Prolongation Theory".

Esta teoría como se ha mencionado sugiere que en ausencia de las condiciones de estabilidad que otorga la organización tonal, los/las oyentes formarían una jerarquía de eventos basada en la predominancia; y en la que tendrían mucho importancia el ritmo y las agrupaciones rítmicas. Nicola Dibben (1999) plantea en su estudio dos experimentos muy relacionados con estas premisas. Se pedía a un grupo de participantes que escuchasen y valorasen cuán completos aparecían diferentes segmentos de música atonal. En el primer experimento se sugiere que los/as oyentes perciben la música atonal según la relativa importancia estructural de los eventos, y que éstos se ven influenciados por su estructura métrica y su duración. El segundo de los experimentos, revela que en la ausencia de un

patrón rítmico, tímbrico o dinámico claro, se infiere igualmente una estabilidad estructural relativa a partir de otros eventos situados a un nivel más superficial. Esta nueva estabilidad se demostró para los eventos como la disonancia en los acordes y el movimiento horizontal de las voces. Asimismo encontramos también otro experimento muy interesante que usa los patrones de coherencia de fase para indagar en la neurología de la tonalidad y la atonalidad (Peretz y Zatorre, 2003). En este caso se crean cuatro series de notas: un tipo de serie aleatorio, otro determinístico, y dos categorías intermedias, una muy impredecible y otra que retiene cierta impredecibilidad. Se concluyó que por una parte que las secuencias aleatorias generaban una menor coherencia de fase en comparación con las demás. Y por otro lado, dentro de las secuencias estructuradas, la intermedia ligeramente impredecible, mostró mayor coherencia de fase que la determinista. Este hecho sugiere que las secuencias más parecidas a melodías, parecen desencadenar un mayor grado de interacción a nivel encefálico. La actividad generada por la secuencia intermedia ligeramente impredecible, fue localizada a nivel del hemisferio posterior izquierdo y algunas regiones del hemisferio derecho.

Respecto a los fenómenos de consonancia y disonancia, la explicación generalmente aceptada es que la disonancia resultaría en un solapamiento entre los tonos de los sonidos a nivel coclear (Helmholtz, 1954). Las neuronas del sistema auditivo se agruparían según su sensibilidad a una o más frecuencias (frecuencias parciales) en concreto, de manera que dispararían potenciales de acción en unos rangos determinados. Así, los intervalos armónicos consonantes provocarían una respuesta de las fibras nerviosas auditivas sincrónica, que conllevaría representaciones precisas de los tonos armónicamente relacionados con el intervalo, además de las notas realmente presentes en él. Es más, todos o la mayoría de parciales podrían ser igualmente registrados. Al contrario, los intervalos disonantes provocarían una actividad en las fibras nerviosas que no conllevaría una representación de las notas constituyentes y las frecuencias parciales se encontrarían demasiado cercanas como para ser resueltas. Por tanto, estos intervalos causarían diferencias en los potenciales de acción de los grupos de neuronas auditivas periféricas y centrales, y ello provocaría la sensación de disonancia (Peretz y Zatorre, 2003). Sin embargo, este fenómeno no explicaría la relación tácitamente establecida entre consonancia como un sonido agradable, y disonancia como un sonido desagradable (McDermott y Hauser, 2005).

Además del juicio estético subjetivo que pueda realizarse, estudios de neuroimagen funcional demuestran que ante estímulos de música consonante y disonante, se activan las mismas regiones activadas para estímulos placenteros y desagradables (Blood, Zatorre, Bermudez y Evans, 1999). Las regiones en las que se registraba un incremento de actividad frente a estímulos disonantes fueron el hipocampo y el precuneus.

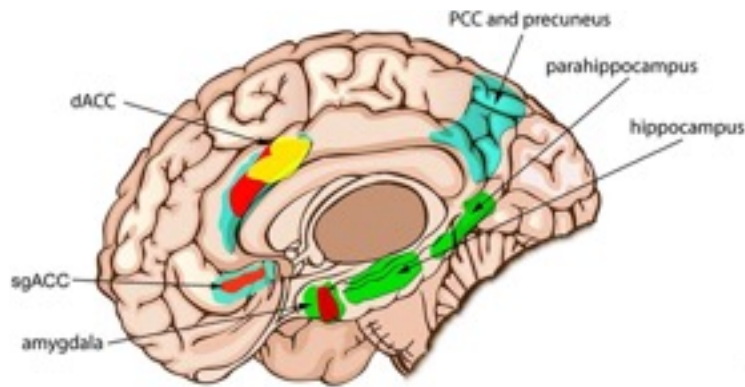


Figura 3. Estructuras del hipocampo y el precuneus. Se muestra la ubicación del precuneus (azul) y el hipocampo (verde), señalados como estructuras activadas durante la percepción de estímulos disonantes. Adaptado (De Ridder, Elgoyhen, Romo y Langguth, 2011).

En los estilos donde predomina la consonancia, se ha descubierto una mayor activación de la corteza orbitofrontal, frontopolar y el cíngulo subcallosal (Phan, Wager, Taylor y Liberzon, 2002), así como del estriado ventral, la ínsula anterior superior y el opérculo rolándico (Koelsch, Fritz, Müller y Friederici, 2006).

Finalmente, cabe remarcar que el proceso musical induce emociones en el/la oyente. Las emociones reportadas en los estudios comprenden desde tristeza, alegría, sorpresa, miedo... Además, se ha observado que éstas no activan y por tanto no son representadas, por las mismas áreas (Altenmüller, Schürmann, Lim y Parlitz, 2002; Brattico, Alluri, Bogert, Jacobsen, Vartiainen, Nieminen y Tervaniemi, 2011; Blood, y Zatorre, 2001; Gosselin, Peretz, Noulhiane, Hasbound, Baulac y Samson, 2005; Koelsch, 2005; Mitterschiffthaler, Fu, Dalton, Andrew y Williams, 2007; Schmidt y Trainor, 2001).

5. Ejemplo práctico de análisis de señales

5.1 Introducción

Tal como hemos nombrado en las anotaciones previas, se ha observado que una manera de evaluar si existen diferencias a nivel cerebral con respecto a la escucha de diferentes estilos musicales, es a través del análisis cuantitativo del EEG. Ello se debe a que, como se ha indicado anteriormente, la audición musical produce cambios en la conectividad funcional EEG (medida mediante coherencia o sincronización EEG en distintas bandas de frecuencia). En este ejemplo práctico utilizaremos la coherencia y analizaremos cuatro situaciones: la audición de un fragmento de música tonal (agradable) y otro de música atonal (no agradable), comparadas con reposo o silencio (neutra) y ruido (muy desagradable). Restringiremos nuestras medidas a la banda alfa del EEG pues es la más estudiada.

5.2 Materiales y métodos

Participantes

El trabajo fue realizado en un grupo de 10 adultos/as sanos/as (5 mujeres y 5 hombres) con edades de entre 30-70 años, de manera voluntaria y sin antecedentes de enfermedades neurológicas. Se firmó un informe de consentimiento informado en el que se les indicaba las características del registro EEG al que iban a ser sometidos con las audiciones correspondientes, y la colocación no invasiva del gorro con los electrodos. Se realizó en el laboratorio de Fisiología de la Universidad de La Laguna.

Instrumentos y Procedimientos

Se realizaron los registros EEG digitales en vigilia y reposo manteniendo los ojos cerrados, utilizando un electroencefalógrafo Nihon Khoden. Estos registros fueron monopolares, referenciados al promedio de los electrodos de referencias A1 y A2 colocadas en los lóbulos de las orejas. Se colocaron en total 16 electrodos/canales de registro EEG en las posiciones frontales (F), centrales (C), temporales (T), parietales (P) y occipitales (O) siguiendo el sistema estándar 10-20; 8 electrodos en el hemisferio izquierdo (Fp1/F3/F7/C3/T3/P3/T5/O1) y 8 en el derecho (Fp2/F4/F8/C4/T4/P4/T6/O2).

Las señales EEG se muestrearon a 500 Hz con filtros en la banda 0,05-40 Hz y filtro de red alrededor de 50 Hz. Se controló la impedancia de los electrodos en un rango 3-5 kOhm. El electro-oculograma, el ECG y los movimientos de respiración abdominal se registraron para detectar artefactos. Se realizaron registros de 30 segundos de duración en las siguientes situaciones experimentales: en reposo o silencio, durante la audición de música tonal, de música atonal y de ruido rosa. Los fragmentos de música tonal pertenecían a la Zarabanda de la pieza barroca "Il Suite para cello solo" de J.S.Bach, y los de música atonal a la obra "Sincro I" de A. González Brito. En cada individuo los registros fueron repetidos 6 veces aleatoriamente para cada situación. De este modo cada individuo disponía de 6 registros de 30 segundos en cada una de las situaciones consideradas. Para cada individuo y situación se seleccionaron/escogieron 15 segmentos/episodios de 16 canales EEG de 5 segundos (2500 muestras) libres de artefactos.

Análisis del módulo de la función de coherencia espectral (COH)

Representa una medida de interdependencia lineal y se calcula de la siguiente manera: para el conjunto de pares de canales EEG, la COH se obtiene a partir de la magnitud al cuadrado de la coherencia que representa una medida (entre 0-1) de la correlación lineal, tanto en amplitud y fase, entre dos señales a una frecuencia dada. Se computa partir de la función (compleja) de la coherencia entre dos señales (x e y) a partir del espectro-cruzado entre las dos señales $P_{xy}(f)$ y los espectros de potencia respectivos, $P_{xx}(f)$ y $P_{yy}(f)$ donde f es la frecuencia. La COH es el módulo al cuadrado de la coherencia $C_{xy}(f)$. La COH se calcula en las cuatro bandas de frecuencia más utilizadas en clínica EEG: delta 0.5-4 Hz, theta 4-8 Hz, alfa 8-13 Hz y beta 13-40 Hz. En nuestro trabajo se ha calculado únicamente en la banda alfa pues es dicha banda a la que se refieren la mayoría de los trabajos realizado en EEG sobre audición e interpretación musical. A partir de las 240 parejas de canales posibles que pueden formarse a partir de los 16 canales registrados (16 canales x 15 parejas por canal), se computan promedios de COH de cada canal con los 15 restantes (promedios intra e inter-hemisféricos) tal como se indica en la figura adjunta para el canal C3.



Figura 4. Situación de los canales/electrodos de registro EEG. Para el canal C3 se indican con flechas las parejas para el cálculo de la COH promedio o global del C3 con el resto de electrodos o canales.

Medidas estadísticas

Utilizamos para comparar las diferencias en las distintas situaciones (SIT) de registro (reposo o silencio, audición tonal, audición atonal y ruido) en los 240 distintos pares de canales, un MANOVA de medidas repetidas.

La técnica de análisis de coherencia se realizó utilizando software en Matlab® desarrollado en el Laboratorio de Biofísica del Departamento de Fisiología de la ULL. Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el programa Statistic®.

5.3 Resultados

A continuación se presentan algunas muestras de los resultados obtenidos para la medida de la COH.

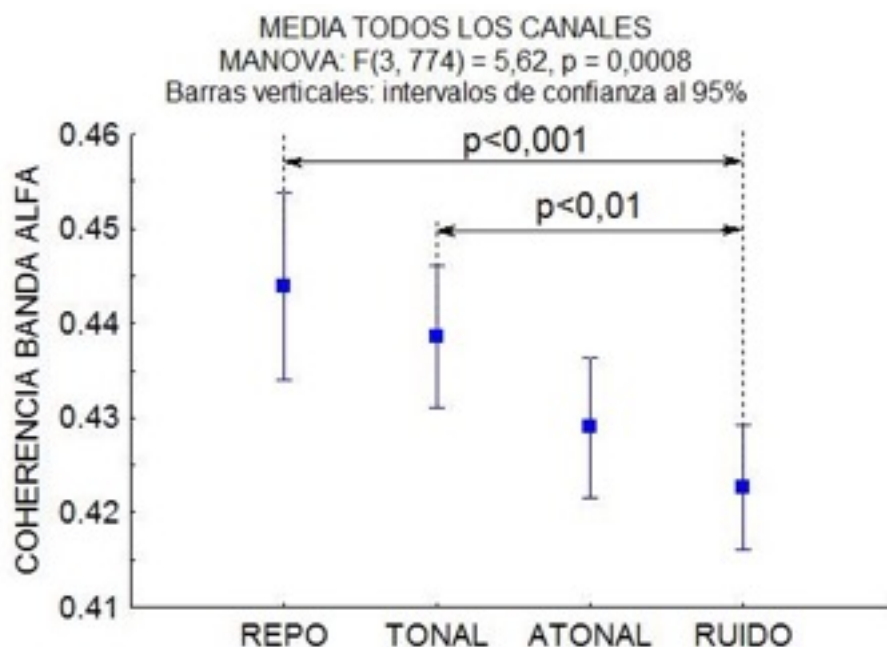


Figura 5. Valores promedios de la COH en banda alfa para el conjunto de canales en cada situación: REPO (audición en silencio), TONAL (durante la audición de música tonal), ATONAL (durante la audición de música atonal) y RUIDO (durante la audición de ruido rosa). Observamos que los valores de la COH (\pm 95% de intervalo de confianza) difieren significativamente para las cuatro situaciones experimentales ($p < 0,01$), siendo el más elevado en la situación REPO, decreciendo durante la audición de música tonal y atonal y alcanzando su mínimo valor durante la audición de ruido. Estadísticamente solo las situaciones REPO y TONAL difieren significativamente de RUIDO tal como se indica en la figura.

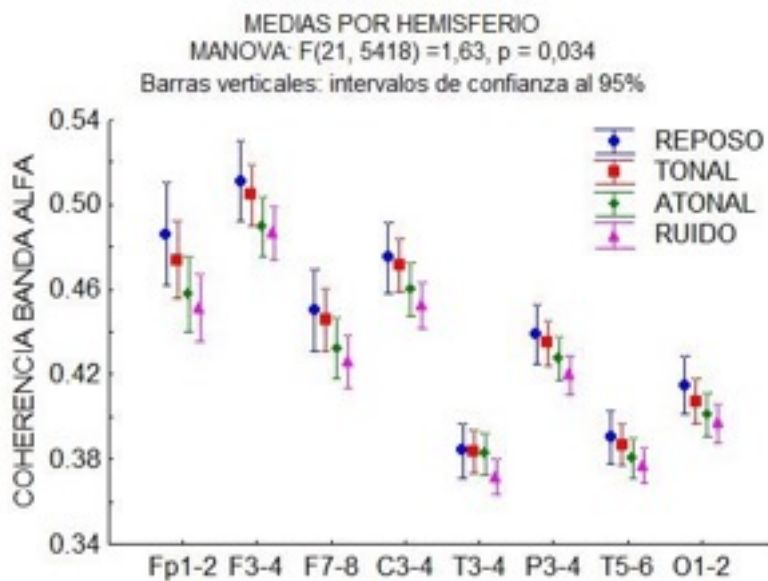


Figura 6. Valores promedios de la COH en banda alfa para los pares de canales simétricos de cada hemisferio y en cada situación: REPOSO (audición en silencio), TONAL (audición tonal), ATONAL (audición atonal) y RUIDO (audición con ruido rosa). Observamos que los valores de la COH (\pm 95% intervalo de confianza) difieren significativamente para los distintos canales ($p < 0,05$), siendo mayores para los canales frontales y central y menores para los canales posteriores parieto-témporo-occipitales. Los temporales bilaterales T3-4 son los de menor COH.

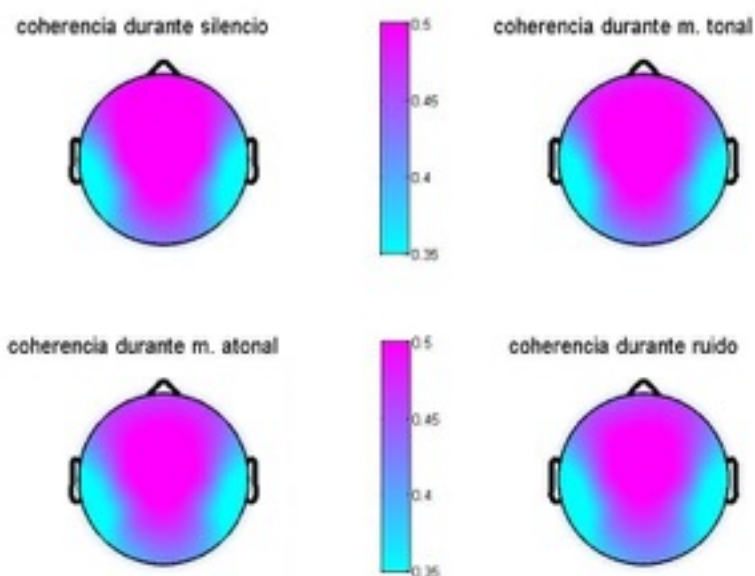


Figura 7. Representación topográfica de los valores globales de COH. Observamos cómo las situaciones de silencio y audición de música tonal presentan los valores de COH más elevados a nivel general, y localizados fundamentalmente en las regiones frontales y centrales. En las regiones posteriores parietales-temporales-occipitales y temporales encontramos valores más bajos. Los valores menores aparecen en las regiones laterales. No se observan diferencias hemisféricas. Las situaciones de audición de música atonal y especialmente de ruido presentan el mismo patrón, pero la dimensión de las áreas de valores importantes de COH es inferior durante la audición de ruido.

Así pues, observamos que durante la audición musical los resultados del MANOVA para el factor de contraste SIT del conjunto de los 240 canales, fueron significativos ($p < 0,001$). La COH en la banda alfa presenta el valor más elevado durante el reposo o silencio, apenas decrece para la audición musical tonal, y los valores más bajos se presentan durante la audición de la pieza atonal y especialmente del ruido (figuras 5, 6 y 7). Además, estadísticamente solo las situaciones de reposo o silencio y audición tonal difieren significativamente de la audición de ruido.

5.4 *Discusión y conclusiones*

En primer lugar confirmamos la idea inicial de que efectivamente diferentes estilos musicales dan resultados diferentes de coherencia, y por tanto, diferencias en la conectividad funcional y actividad cerebral. Resultados semejantes fueron obtenidos en el estudio de Petsche, Kaplan, Von Stein y Filz (1997) que comparaba la audición de fragmentos de obras de Bach, Beethoven, Schönberg y jazzísticas. Sin embargo, en este trabajo se defendía que las disparidades en la coherencia para las bandas, incluida la banda alfa, se deberían a diferencias en el *background* de cada individuo más que al estilo musical en sí. En nuestro caso de estudio, los dos estilos musicales analizados corresponden a un fragmento de música barroca y un fragmento de música atonal, y podemos afirmar que además de existir diferencias para la coherencia, éstas son significativas.

Desde un punto de vista musicológico y tal como se ha expuesto en la descripción de las características de las corrientes musicales académicas occidentales, la música barroca sería la primera en desarrollarse propiamente dentro del marco de la tonalidad. Por otro lado, como también se ha explicado, la mayoría de movimientos del siglo XX se desarrollaría en un sistema atonal. La construcción de las obras en un marco u otro, genera unas características musicológicas asociadas que podríamos señalar como opuestas. En el fragmento barroco la tonalidad daría lugar a un equilibrio entre consonancia y disonancia. Sin embargo, en el segundo fragmento, la atonalidad daría lugar a un sonido altamente disonante. En términos neurológicos se ha señalado que en la disonancia se produciría un solapamiento entre los tonos de los sonidos a nivel coclear (Helmholtz, 1954). Y que éste sería el motivo por el que provocaría las sensaciones desagradables reportadas, aunque se encuentra todavía en debate si está sería una relación de causalidad (McDermott y Hauser, 2005). A nivel musicológico, se ha postulado también que aunque ambas formas presentarían una secuencia de creación y resolución de expectativas (Lerdahl, 1989), sólo en la tonal serían identificables para la mayoría de individuos. De esta manera se ha señalado que la identificación de las expectativas y su resolución, derivaría en emociones placenteras. A nivel neurológico se ha explicado este fenómeno a través de la activación del sistema límbico de recompensa, que se asociaría a la función biológica de premiar las predicciones correctas (Zatorre y Salimpoor, 2013). Por tanto, partiendo de unas determinadas características musicales transportadas a sus consecuencias neurológicas, proponemos la explicación para la diferencia en la coherencia entre los dos estilos musicales, la música barroca (asociada a emociones agradables) y la atonal (asociada a emociones desagradables). La diferencia se refleja como valores de coherencia apenas decrecientes en la música tonal respecto al reposo o silencio, frente a valores decrecientes en la música atonal.

Asimismo, a raíz de los resultados obtenidos también matizamos que para las cuatro situaciones obtenemos los valores de coherencia más elevados en las regiones frontales y centrales. Los valores más bajos se presentan para las regiones posteriores parietales-temporales-occipitales y temporales, los inferiores aparecen en las regiones laterales. Y entre hemisferios no observamos diferencias. De cara al futuro es de interés fundamental la identificación de aquellos puntos en los que se generarían elevados o bajos valores de coherencia. Estas localizaciones podrían servir para relacionar las respuestas a estímulos musicales con los mecanismos, que aunque sólo a nivel cortical, estarían implicados en ellas.

Son pocos los estudios de la literatura que analizan las diferencias y la localización de la medida de la coherencia de la banda alfa para situaciones que impliquen de alguna manera un

contraste entre tonalidad y atonalidad. Sin embargo, encontramos algunos ejemplos que aunque no siguen el mismo procedimiento para el análisis de señales, consideramos adecuados reunir con vistas a futuras investigaciones (Flores-Gutiérrez, Díaz, Barrios, Favila-Humara, Guevara, del Río-Portilla y Corsi-Cabrera, 2007; Flores-Gutiérrez, Díaz, Barrios, Guevara, del Río-Portilla, Corsi-Cabrera y del Flores-Gutiérrez, 2009; Ruiz *et al.*, 2009). En el estudio realizado por Ruiz *et al.* (2009) ya mencionado en las técnicas de EEG cuantitativo, se observa que ante incongruencias musicales -como las que podrían generarse en contextos atonales- se produce una desincronización en la banda alfa de 9-10 Hz de las regiones fronto-centrales derechas y temporales izquierdas. Como se ha señalado anteriormente, la sincronía de fase es otra de las medidas eficientes para el análisis de la conectividad funcional (Damasio, 1990; Friston *et al.*, 1997; Varela *et al.*, 2001). Observamos como en este caso, los resultados obtenidos para la conectividad funcional diferirían de los nuestros. Por otro lado, Flores-Gutiérrez *et al.* (2007) analizaron los valores de coherencia intrahemisférica ante estímulos agradables y no agradables. Los resultados obtenidos para los estímulos agradables - generados por fragmentos de Bach y Mahler y que podríamos extender a nuestro fragmento barroco-, mostraban coherencias en la banda alfa de 10-13 Hz en casi todos los electrodos del hemisferio izquierdo, con puntos que se situaban concretamente en las regiones tempoparietales y occipitales. Por último, en el estudio por Flores-Gutiérrez *et al.* (2009) para la coherencia funcional intrahemisférica, se obtuvo que: emociones agradables -generadas nuevamente por fragmentos de Bach y Mahler y que podríamos extender a nuestro fragmento barroco-, aumentaron la coherencia en la banda alfa de 10-13Hz en las regiones anteriores y posteriores del hemisferio izquierdo de hombres y mujeres. Y por otro lado, las emociones desagradables -generadas por fragmentos de Prodomidès y que podríamos relacionar con las emociones desagradables asociadas al fragmento atonal- alteraban los valores de coherencia entre las regiones posteriores del hemisferio izquierdo en hombres, y en ambos hemisferios en mujeres.

Finalmente, nos detenemos en el análisis de los resultados para las cuatro condiciones. De esta manera encontramos que los valores de coherencia y por tanto conectividad funcional más elevados, se presentan en la situación de reposo, seguidos por los de la audición de música tonal. Y que estos valores decrecen significativamente para la audición de música atonal o ruido. De cara a nuevas investigaciones, sería interesante estudiar los mecanismos por los que la respuesta a la situación de reposo presentaría una mayor coherencia en la banda alfa y por qué sucedería a la inversa ante el estímulo del ruido.

Con todo lo expuesto, nos gustaría concluir remarcando que de acuerdo a la hipótesis planteada en la introducción, diferentes tipos de extractos musicales presentarían diferencias en la conectividad funcional. Que ésta puede ser evaluada eficientemente a través del EEG cuantitativo, como medida de la coherencia espectral en la banda alfa. Que por un lado, en la música barroca, con tonalidad y que genera sensaciones agradables, la coherencia apenas decrece respecto a la situación de reposo o silencio. Mientras que con la música atonal disonante y fundamentalmente con el ruido, que producen sensaciones desagradables en los individuos, se genera un decrecimiento de la coherencia. Y finalmente, que estadísticamente solo las situaciones de reposo o silencio y de audición tonal diferirían significativamente de la audición de ruido.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aboud, F. E. (1988). *Children and prejudice*. New York, NY: B. Blackwell, 1988.
- Altenmüller, E., Schürmann, K., Lim, V. K., y Parlitz, D. (2002). Hits to the left, flops to the right: different emotions during listening to music are reflected in cortical lateralisation patterns. *Neuropsychologia*, 40(13), 2242-2256.
- Atlas, A. W. (2002). *La música del Renacimiento* (Vol. 2). Madrid: Ediciones AKAL.

- Auzou, P., Eustache, F., Etevenon, P., Platel, H., Rioux, P., Lambert, J., y Baron, J. C. (1995). Topographic EEG activations during timbre and pitch discrimination tasks using musical sounds. *Neuropsychologia*, 33(1), 25-37.
- Avitan, L., Teicher, M., y Abeles, M. (2009). EEG generator—a model of potentials in a volume conductor. *Journal of neurophysiology*, 102(5), 3046-3059.
- Ayotte, J., Peretz, I., Rousseau, I., Bard, C., y Bojanowski, M. (2000). Patterns of music agnosia associated with middle cerebral artery infarcts. *Brain*, 123(9), 1926-1938.
- Bhattacharya, J., y Petsche, H. (2001). Universality in the brain while listening to music. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 268(1484), 2423-2433.
- Bhattacharya, J., Petsche, H., y Pereda, E. (2001). Long-range synchrony in the γ band: role in music perception. *Journal of Neuroscience*, 21(16), 6329-6337.
- Blood, A. J., y Zatorre, R. (2001). Intensely pleasurable responses to music correlates with activity in brain regions implicated in reward and emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98, 11818–11823.
- Blood, A. J., Zatorre, R. J., Bermudez, P., y Evans, A. C. (1999). Emotional responses to pleasant and unpleasant music correlate with activity in paralimbic brain regions. *Nature neuroscience*, 2(4), 382-387.
- Brattico, E., Alluri, V., Bogert, B., Jacobsen, T., Vartiainen, N., Nieminen, S. K., y Tervaniemi, M. (2011). A functional MRI study of happy and sad emotions in music with and without lyrics. *Frontiers in psychology*, 2, 308.
- Brattico, E., Tervaniemi, M., Näätänen, R., y Peretz, I. (2006). Musical scale properties are automatically processed in the human auditory cortex. *Brain research*, 1117(1), 162-174.
- Busk, J., y Galbraith, G. C. (1975). EEG correlates of visual-motor practice in man. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 38(4), 415-422.
- Buzsáki, G., Anastassiou, C. A., y Koch, C. (2012). The origin of extracellular fields and currents—EEG, ECoG, LFP and spikes. *Nature reviews neuroscience*, 13(6), 407-420.
- Collura, T. F. (1993). History and evolution of electroencephalographic instruments and techniques. *Journal of clinical neurophysiology*, 10(4), 476-504.
- Da Silva, F. L. (2009). EEG: Origin and measurement. En *EEG-fMRI* (pp. 19-38). Springer Berlin Heidelberg.
- Damasio, A. R. (1990). Synchronous activation in multiple cortical regions: a mechanism for recall. *Seminars in the Neurosciences* 2:287-96.
- De Ridder, D., Elgoyhen, A. B., Romo, R., & Langguth, B. (2011). Phantom percepts: tinnitus and pain as persisting aversive memory networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(20), 8075-8080.
- Dibben, N. (1999). The perception of structural stability in atonal music: The influence of salience, stability, horizontal motion, pitch commonality, and dissonance. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 16(3), 265-294.
- Flores-Gutiérrez, E. O., Díaz, J. L., Barrios, F. A., Favila-Humara, R., Guevara, M. Á., del Río-Portilla, Y., y Corsi-Cabrera, M. (2007). Metabolic and electric brain patterns during pleasant and unpleasant emotions induced by music masterpieces. *International Journal of Psychophysiology*, 65(1), 69-84.
- Flores-Gutiérrez, E. O., Díaz, J. L., Barrios, F. A., Guevara, M. Á., del Río-Portilla, Y., Corsi-Cabrera, M., y del Río-Portilla, E. O. (2009). Differential alpha coherence hemispheric patterns in men and women during pleasant and unpleasant musical emotions. *International Journal of Psychophysiology*, 71(1), 43-49.
- Francès, R. (1954). *Recherches expérimentales sur la perception de la mélodie*. Presses Universitaires de France.
- French, C. C., y Beaumont, J. G. (1984). A critical review of EEG coherence studies of hemisphere function. *International Journal of Psychophysiology*, 1(3), 241-254.
- Friston, K. J., Stephan, K. M., y Frackowiak, R. S. J. (1997). Transient phase-locking and dynamic correlations: Are they the same thing?. *Human brain mapping*, 5(1), 48-57.

- Gardner, W. A. (1992). A unifying view of coherence in signal processing. *Signal Processing*, 29(2), 113-140.
- González, A. (2016). El violonchelo en la música contemporánea: un estudio de musicología carnal (tesis de doctorado). Universidad de la Laguna, San Cristóbal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife.
- Gosselin, N., Peretz, I., Noulhiane, M., Hasboun, D., Baulac, M., y Samson, S. (2005). Impaired recognition of scary music following unilateral temporal lobe excision. *Brain*, 128, 628–640.
- Griffiths, P. (2009). *Breve historia de la música occidental* (Vol. 26). Madrid: Ediciones AKAL.
- Grout, D. J., y Palisca, C. V. (1990). *Historia de la música occidental* (vol 1 y 2). Madrid: Alianza Música.
- Halsband, U., Ito, N., Tanji, J., y Freund, H. J. (1993). The role of premotor cortex and the supplementary motor area in the temporal control of movement in man. *Brain*, 116(1), 243-266.
- Heilman, K.M. (1997). The neurobiology of emotional experience. *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neuroscience*, 9, 439–48.
- Helmholtz, H. L. F. (1954). *On the sensations of tone*. New York: Dover.
- Hoppin, R. H. (2000). *La música medieval* (Vol. 1). Madrid: Ediciones AKAL.
- Iwaki, T., Hayashi, M., y Hori, T. (1997). Changes in alpha band EEG activity in the frontal area after stimulation with music of different affective content. *Perceptual and motor skills*, 84(2), 515-526.
- Jacobs, A. (1979). *Breve historia de la música occidental*. Barcelona: Monte Avila.
- Jatupaiboon, N., Pan-ngum, S., y Israsena, P. (2013, May). Emotion classification using minimal EEG channels and frequency bands. En *Computer Science and Software Engineering (JCSSE), 2013 10th International Joint Conference on*. (pp. 21-24). IEEE.
- Kabuto, M., Kageyama, T., y Nitta, H. (1993). EEG power spectrum changes due to listening to pleasant musics and their relation to relaxation effects. *Nippon Eiseigaku Zasshi (Japanese Journal of Hygiene)*, 48(4), 807-818.
- Koelsch, S. (2005). Investigating Emotion with Music. Neuroscientific Approaches. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, 412 – 418.
- Koelsch, S., Fritz, T., Müller, K., y Friederici, A. D. (2006). Investigating emotion with music: an fMRI study. *Human brain mapping*, 27(3), 239-250.
- Koelsch, S., y Mulder, J. (2002). Electric brain responses to inappropriate harmonies during listening to expressive music. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 862-869.
- Kraskov, A., Kreuz, T., Quiroga, R. Q., Grassberger, P., Mormann, F., Andrzejak, R. G., ... y Lehnertz, K. (2002). Comparison Of Two Phase-synchronization Analyses Techniques For Interictal Focus Lateralization In Mesial Temporal Lobe Epilepsy. *Epilepsia*, 43, 48.
- Krumhansl, C. L., Sandell, G. J., y Sergeant, D. C. (1987). The perception of tone hierarchies and mirror forms in twelve-tone serial music. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 5(1), 31-77.
- Lachaux, J. P., Rodriguez, E., Martinerie, J., y Varela, F. J. (1999). Measuring phase synchrony in brain signals. *Human brain mapping*, 8(4), 194-208.
- Lerdahl, F. (1989). Atonal prolongational structure. *Contemporary Music Review*, 4(1), 65-87.
- Levitin, D. J., y Menon, V. (2003). Musical structure is processed in “language” areas of the brain: a possible role for Brodmann Area 47 in temporal coherence. *Neuroimage*, 20(4), 2142-2152.
- Liégeois-Chauvel, C., Peretz, I., Babić, M., Laguitton, V., y Chauvel, P. (1998). Contribution of different cortical areas in the temporal lobes to music processing. *Brain*, 121(10), 1853-1867.
- Llobera, M. N., Rial, R. V., y Darde, J. B. (1995). *Manual de técnicas en electrofisiología clínica*. Universitat de les Illes Balears.
- McDermott, J., y Hauser, M. (2005). The origins of music: Innateness, uniqueness, and evolution. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 23(1), 29-59.
- McLeish, K., McLeish, V., Reverter, A., y Adrián, E. P. (2000). *La discoteca ideal de música clásica*. Barcelona: Planeta.
- Menon, V., y Levitin, D. J. (2005). The rewards of music listening: response and physiological connectivity of the mesolimbic system. *Neuroimage*, 28(1), 175-184.
- Michels, U., y Mames, L. (1998). *Atlas de música*, I. Madrid: Alianza Editorial.

- Miranda, E. R. (2010). Organised Sound, Mental Imagery and the Future of Music Technology: a neuroscience outlook. *Organised Sound*, 15(01), 13-25.
- Miller, G. (2000). *Evolution of human music through sexual selection* (pp. 329-360). Cambridge, MA: MIT Press.
- Mitterschiffthaler, M. T., Fu, C. H., Dalton, J. A., Andrew, C. M., y Williams, S. C. (2007). A functional MRI study of happy and sad affective states induced by classical music. *Human brain mapping*, 28(11), 1150-1162.
- Morgan, R. P. (1994). *La música del siglo XX* (Vol. 6). Madrid: Ediciones AKAL.
- Niedermeyer, E., y da Silva, F. L. (Eds.). (2005). *Electroencephalography: basic principles, clinical applications, and related fields*. Lippincott Williams y Wilkins.
- Nunez, P. L. (1997). EEG coherence measures in medical and cognitive science: a general overview of experimental methods, computer algorithms, and accuracy. *Quantitative and Topological EEG and MEG Analysis*. Universitätsverlag Druckhaus Mayer-Jena.
- Ockelford, A., y Sergeant, D. (2013). Musical expectancy in atonal contexts: Musicians' perception of "antistructure". *Psychology of Music*, 41(2), 139-174.
- Passynkova, N., Neubauer, H., y Scheich, H. (2007). Spatial organization of EEG coherence during listening to consonant and dissonant chords. *Neuroscience letters*, 412(1), 6-11.
- Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature neuroscience*, 6(7), 674-681.
- Pavlygina, R. A., Sakharov, D. S., y Davydov, V. I. (2004). Spectral analysis of the human EEG during listening to musical compositions. *Human Physiology*, 30(1), 54-60.
- Penhune, V. B., y Doyon, J. (2002). Dynamic cortical and subcortical networks in learning and delayed recall of timed motor sequences. *Journal of Neuroscience*, 22(4), 1397-1406.
- Peretz, I. (1990). Processing of local and global musical information by unilateral brain-damaged patients. *Brain*, 113(4), 1185-1205.
- Peretz, I., y Kolinsky, R. (1993). Boundaries of separability between melody and rhythm in music discrimination: A neuropsychological perspective. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 46(2), 301-325.
- Peretz, I., y Zatorre, R. J. (Eds.). (2003). *The cognitive neuroscience of music* (pp. 192-203). Oxford: Oxford University Press.
- Pereyra, J. S. (2011). *Metodos en neurociencias cognitivas*. México: Editorial El Manual Moderno.
- Peterson, D. A., y Thaut, M. H. (2007). Music increases frontal EEG coherence during verbal learning. *Neuroscience letters*, 412(3), 217-221.
- Petsche, H., Linder, K., Rappelsberger, P., y Gruber, G. (1988). The EEG: An adequate method to concretize brain processes elicited by music. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 6(2), 133-159.
- Petsche, H., Richter, P., Von Stein, A., Etlinger, S. C., y Filz, O. (1993). EEG coherence and musical thinking. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 11(2), 117-151.
- Petsche, H. (1996). Approaches to verbal, visual and musical creativity by EEG coherence analysis. *International Journal of Psychophysiology*, 24(1), 145-159.
- Petsche, H., Kaplan, S., Von Stein, A., y Filz, O. (1997). The possible meaning of the upper and lower alpha frequency ranges for cognitive and creative tasks. *International journal of psychophysiology*, 26(1), 77-97.
- Petsche, H., y Etlinger, S. C. (1998). *EEG and thinking: power and coherence analysis of cognitive processes*. Verlag d. Österr. Akad. d. Wiss..
- Phan, K.L., Wager, T., Taylor, S.F., Liberzon, I. (2002). Functional neuroanatomy of emotion: a meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI. *NeuroImage* 16(2):331- 48.
- Piccirilli, M., Sciarra, T., y Luzzi, S. (2000). Modularity of music: evidence from a case of pure amusia. *Journal of Neurology, Neurosurgery y Psychiatry*, 69(4), 541-545.
- Pietro, M. D., Laganaro, M., Leeman, B., y Schnider, A. (2004). Receptive amusia: temporal auditory deficit in a professional musician following a left temporo-parietal lesion. *Neuropsychologia*, 42, 868-877.
- Randel, D. M., y Gago, L. C. (1997). *Diccionario Harvard de música*. Madrid: Alianza Editorial.
- Rao, S. M., Harrington, D. L., Haaland, K. Y., Bobholz, J. A., Cox, R. W., y Binder, J. R. (1997). Distributed neural systems underlying the timing of movements. *Journal of Neuroscience*, 17(14), 5528-5535.

- Rao, S. M., Mayer, A. R., y Harrington, D. L. (2001). The evolution of brain activation during temporal processing. *Nature neuroscience*, 4(3), 317-323.
- Ruiz, M. H., Koelsch, S., y Bhattacharya, J. (2009). Decrease in early right alpha band phase synchronization and late gamma band oscillations in processing syntax in music. *Human brain mapping*, 30(4), 1207-1225.
- Sadie, S. (Ed.). (1980). *The new Grove dictionary of music and musicians*. Londres: Macmillan Press.
- Sakharov, D. S., Davydov, V. I., y Pavlygina, R. A. (2005). Intercentral relations of the human EEG during listening to music. *Human Physiology*, 31(4), 392-397.
- Sammler, D., Grigutsch, M., Fritz, T., y Koelsch, S. (2007). Music and emotion: electrophysiological correlates of the processing of pleasant and unpleasant music. *Psychophysiology*, 44(2), 293-304.
- Samson, S., y Zatorre, R. J. (1994). Contribution of the right temporal lobe to musical timbre discrimination. *Neuropsychologia*, 32(2), 231-240.
- Schack, B., y Weiss, S. (2005). Quantification of phase synchronization phenomena and their importance for verbal memory processes. *Biological cybernetics*, 92(4), 275-287.
- Schaefer, R. S., Vlek, R. J., y Desain, P. (2011). Music perception and imagery in EEG: Alpha band effects of task and stimulus. *International Journal of Psychophysiology*, 82(3), 254-259.
- Schmidt, L. A., y Trainor, L. J. (2001). Frontal brain electrical activity (EEG) distinguishes valence and intensity of musical emotions. *Cognition y Emotion*, 15(4), 487-500.
- Schoenberg, A. (1984). Style and Idea, trans. *Dika Newlin (New York, 1950)*, 5.
- Teplan, M. (2002). Fundamentals of EEG measurement. *Measurement science review*, 2(2), 1-11.
- Tillmann, B., y Bigand, E. (2004). The relative importance of local and global structures in music perception. *The Journal of Aesthetics and Art Criticism*, 62(2), 211-222.
- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E., y Martinerie, J. (2001). The brainweb: phase synchronization and large-scale integration. *Nature reviews neuroscience*, 2(4), 229-239.
- Vignolo, L. A. (2003). Music agnosia and auditory agnosia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999(1), 50-57.
- Wallin, N. L., y Merker, B. (2001). *The origins of music*. MIT press.
- Wessinger, C. M., Buonocore, M. H., Kussmaul, C. L., & Mangun, G. R. (1997). Tonotopy in human auditory cortex examined with functional magnetic resonance imaging. *Human brain mapping*, 5(1), 18-25.
- Williamson, S. J., Romani, G. L., Kaufman, L., y Modena, I. (2013). *Biomagnetism: an interdisciplinary approach* (Vol. 66). Springer Science and Business Media.
- Yuan, Q., Liu, X. H., Li, D. C., Wang, H. L., y Liu, Y. S. (2000). Effects of noise and music on EEG power spectrum. *Space Medicine and Medical Engineering*, 13(6), 401-404.
- Zatorre, R. J. (1985). Discrimination and recognition of tonal melodies after unilateral cerebral excisions. *Neuropsychologia*, 23(1), 31-41.
- Zatorre, R. J. (1988). Pitch perception of complex tones and human temporal-lobe function. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 84(2), 566-572.
- Zatorre, R. J., Belin, P., y Penhune, V. B. (2002). Structure and function of auditory cortex: music and speech. *Trends in cognitive sciences*, 6(1), 37-46.
- Zatorre, R. J., Evans, A. C., y Meyer, E. (1994). Neural mechanisms underlying melodic perception and memory for pitch. *Journal of Neuroscience*, 14(4), 1908-1919.
- Zatorre, R. J., y Salimpoor, V. N. (2013). From perception to pleasure: music and its neural substrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(Supplement 2), 10430-10437.
- Partituras**
- Bach, J.S. (2012). *Preludio y fuga en do mayor BWV 846*. Montréal: Ed. Les Éditions Outremontaises.
- Berg, A. (1927). *Suite Lirica*. Viena: Ed. Universal Edition.