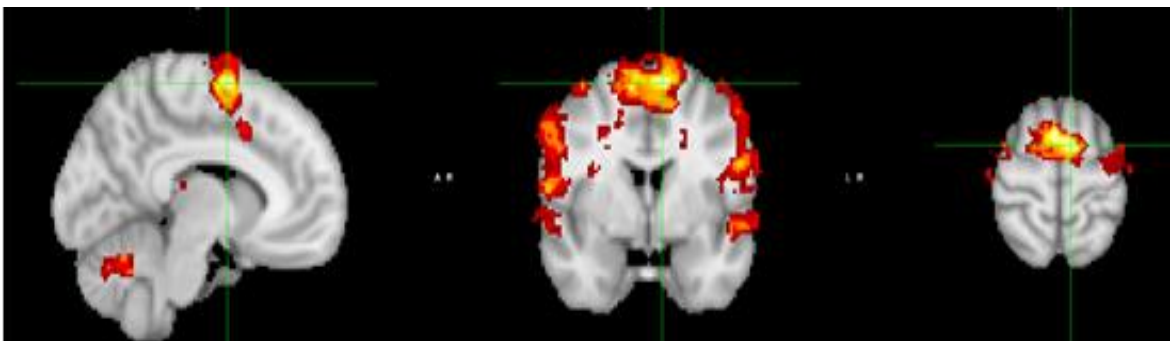


Estudio con fMRI sobre la producción del lenguaje en español y en Silbo gomero



Trabajo de Fin de Grado de Psicología
Universidad de La Laguna
Facultad de Psicología y Logopedia
Curso académico 2018-2019

Tutor:
Niels Janssen

Alumnos:
Enrique Brito-Serrador García
Esther Sánchez Hernández



ÍNDICE

I.	RESUMEN	3
II.	ABSTRACT	4
III.	INTRODUCCIÓN	5
IV.	MÉTODO	9
	a. PARTICIPANTES	9
	b. INSTRUMENTOS	9
	c. DISEÑOS	10
V.	ANÁLISIS	11
	a. PREPROCESAMIENTO	11
	b. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	12
VI.	RESULTADOS	14
VII.	DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	23
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	27



RESUMEN

El silbo gomero (dialecto autóctono de la isla de La Gomera) sustituye las vocales y consonantes del español por silbidos, reduciéndose a dos sonidos para las vocales y cuatro para las consonantes. En 2005, se realizó un estudio con fMRI en una muestra de silbadores gomeros, y se encontró que en los sujetos se activaban aproximadamente las mismas zonas para la comprensión del español y del silbo gomero (Carreiras et al., 2005). Por lo que nos preguntamos, ¿se activarán, además, las mismas áreas cerebrales durante la producción del lenguaje oral, en español, y durante el Silbo gomero?

El objetivo de este estudio fue darle respuesta a esta pregunta. Mediante un análisis de imágenes en Resonancia Magnética Funcional, encontramos que se produjo una activación similar a la hora de producir lenguaje oral y silbado en el Área de Broca y sus áreas adyacentes, en el hipocampo izquierdo y en regiones temporooccipitales.

Palabras clave: Silbo Gomero, Resonancia Magnética Funcional (fMRI), Lenguaje.



ABSTRACT

Silbo Gomero (native dialect of La Gomera island) replaces the vowels and consonants of Spanish by whistles, reducing it to two sounds for vowels and four for the consonants. In 2005, a study was conducted with fMRI in a sample of *Silbo Gomero*, and it was found that in participants, approximately the same zones were activated for the comprehension of Spanish and the *Silbo Gomero* (Carreiras et al., 2005). As we ask, Will the same brain areas were activated during the production of oral language, in Spanish, and during *Silbo Gomero*?

The objective of this study was to answer this question, through an analysis of images in Functional Magnetic Resonance. We found that a similar activation occurred when producing oral and whistled language in the Broca area and its adjacent areas, in the left hippocampus and in the temporooccipital regions.

Key words: *Silbo Gomero*, Functional Magnetic Resonance (fMRI), language.

INTRODUCCIÓN

Los seres humanos tenemos la capacidad de expresar pensamientos y sentimientos por medio de la palabra gracias al lenguaje. Hoy en día, la principal función que se le otorga es la de transmitir significado entre individuos (Maestú, 2008). Así, no es de extrañar que la comunicación, y en concreto el lenguaje, sea objeto de infinidad de estudios, tratando de conocer todas las características de esta curiosa capacidad. En el presente estudio tratamos de investigar sobre las similitudes y diferencias en activación cerebral en relación a la producción de lenguaje de manera oral (en español) y mediante Silbo Gomero, con el fin de comprobar si, a este último, también se le podría considerar una forma de lenguaje. Para ello hemos analizado imágenes de Resonancia Magnética Funcional (fMRI) de participantes hablantes de español y pertenecientes a una escuela de Silbo Gomero de la isla de Tenerife.

Aunque la comunicación es algo propio del reino animal (desde pequeños invertebrados hasta grandes mamíferos), los miembros de cualquier especie se comunican con sus iguales con el fin de sobrevivir y prosperar en un entorno hostil, tan solo podemos denominar a esa forma de comunicación ‘lenguaje’ en el caso de los humanos puesto que ese intercambio se realiza utilizando un contexto y un medio delimitado por reglas sistemáticas y formales. Debido a lo mencionado anteriormente, no es de extrañar que hayan sido numerosos los investigadores e investigadoras que hayan querido centrar sus estudios de fMRI en investigar sobre el aprendizaje y áreas cerebrales encargadas de este maravilloso acto.

Hay que mencionar que mucho de lo que se conoce hoy en día sobre el lenguaje y el cerebro, es debido al estudio de la Afasia. El término ‘Afasia’ hace referencia a la pérdida parcial o total de la capacidad de hablar debido a un daño cerebral, sin una pérdida de las capacidades cognitivas. Mediante diferentes investigaciones como las que realizaron los neurólogos Paul Broca y Karl Wernicke se localizaron las diferentes estructuras cerebrales encargadas del lenguaje: el área de Broca, con localización frontal; el área de Wernicke, en la parte superior del lóbulo temporal, la corteza auditiva, localizada en el lóbulo temporal; la circunvolución angular y la corteza motora en el lóbulo parietal.

Otra manera de estudiar el lenguaje es mediante la Resonancia Magnética (RM), que es, actualmente, la técnica más utilizada en las neurociencias. Dentro de las diferentes



aplicaciones de la RM encontramos la Resonancia Magnética Funcional (RMf) que constituye un gran avance debido a su revolucionaria técnica para analizar la actividad cerebral, además de por su capacidad de fusionar con exactitud las diferentes imágenes extraídas; funcionales y estructurales. Además, la inocuidad de la técnica se considera una característica básica que la hace óptima para utilizar en investigación.

Actualmente, gracias al desarrollo de técnicas como la Resonancia Magnética (RM), se sabe cuáles son las áreas cerebrales encargadas del lenguaje. Se ha visto que, en tarea de fluidez verbal, donde los participantes tienen que decir palabras que empiecen por una letra proporcionada por los investigadores, se ha producido actividad en el área frontal inferior izquierda y frontal superior, en el área de Wernicke y sus alrededores, en el giro temporal superior y en el cerebelo derecho (Cuenod et al., 1995). Por otro lado, Ardila, Bernal y Rosselli (2016) encontraron que en la circunvolución frontal izquierda está el área encargada de la parte motora del lenguaje, se trataría del área de Broca, junto con la corteza motora inferior, las áreas subcorticales subyacentes y la materia blanca periventricular. Además, afirmaron que en la primera circunvolución temporal izquierda se encuentra el área de Wernicke, y ésta, junto a las áreas subyacentes, son las encargadas del sistema léxico y semántico, se las considera las 'áreas de asociación lingüística'. Por último, comprobaron que la ínsula está involucrada en la producción verbal, además de en la comprensión del lenguaje. Por otro lado, Álvarez-Linera, Martín-Plasencia, Maestú-Urbe, Sola, Benítez y Serrano (2002) descubrieron que tras analizar los dos hemisferios cerebrales, en tareas de fluidez fonológica había una mayor lateralización del lenguaje en el hemisferio izquierdo en áreas frontales y temporales, en participantes diestros.

Otra fuente de información sobre la organización cerebral del lenguaje procede de los estudios con diferentes lenguas. Durante el análisis de la lengua de signos, una investigación realizada en el año 2000 sobre la actividad cerebral durante un discurso mediante lengua de signos en personas sordas afirmó que las personas sordas procesan aspectos específicos de la lengua de signos en áreas clave del cerebro que se relacionan con el lenguaje; la corteza frontal inferior izquierda cuando los participantes produjeron signos y el plano temporal bilateral cuando veían signos o partes sin significado (Petitto et al., 2000). Debido a ello se comenta que la lengua de signos dispone de propiedades y principios de organización cerebral similares a los implicados en el lenguaje oral. Neville et al. (1998) también investigaron sobre lengua de signos, encontrando una lateralización

del lenguaje en el hemisferio izquierdo para personas que hablan mediante lengua de signos; dándose un patrón de activación similar al que se da en personas capaces de comunicarse oralmente. Estos resultados, así como los obtenidos por Hickok, Bellugi & Klima (1998) en estudios con afásicos de lengua de signos, sugieren que es la propia naturaleza lingüística de la información, más que la modalidad de la misma, lo que influye en la organización neuronal.

A continuación, se añade una pequeña tabla a modo resumen de las áreas mencionadas anteriormente y su función cerebral relacionada con el lenguaje.

Tabla 1

Áreas cerebrales involucradas en el lenguaje

ÁREA CEREBRAL	FUNCIÓN
Área frontal inferior izquierda (área de Broca)	Producción de lenguaje (palabras, signos...)
Área temporal bilateral (área de Wernicke)	Comprensión del lenguaje
Ínsula	Producción verbal y comprensión del lenguaje
Cerebelo	Composición sintáctica, articulación, comprensión y generación de palabras
Giro temporal superior	Procesamiento del lenguaje auditivo

Llegados a este punto, muchos se preguntarán ¿se activarán las mismas áreas del cerebro independientemente de la modalidad que se utilice? O, por el contrario, ¿dependiendo de la modalidad que se utilice para su transmisión se activarán unas zonas u otras? Con el propósito de aportar más datos al respecto, el presente estudio investigará en una muestra de silbadores gomeros qué áreas se activan durante la producción de dicho dialecto.

Atendiendo a los datos obtenidos hasta el momento sobre cómo se organiza el cerebro en el lenguaje de signos, parece necesario investigar cómo se comporta en otras formas de lenguaje. Siguiendo este planteamiento, el presente estudio tomará como objetivo el *silbo gomero* para investigar diferentes aspectos que se mencionan posteriormente.



El *silbo gomero* es un lenguaje silbado que utilizan algunos habitantes de la isla de La Gomera para comunicarse en barrancos o zonas montañosas (Canarias, España). Como indica la UNESCO, el silbo gomero reemplaza las vocales y consonantes del español (o cualquier otro idioma) por silbidos: dos silbidos diferenciados hacen la función de las cinco vocales españolas; y otros cuatro de las consonantes. Con esos pocos elementos, los silbadores más experimentados pueden transmitir todo tipo de mensajes, jugando tan solo con la tonalidad y continuidad/discontinuidad del silbido. Debido a las particularidades de este lenguaje y para evitar que desaparezca, el *silbo gomero* fue inscrito en 2009 como Patrimonio Cultural Inmaterial de la Humanidad y actualmente se enseña en todos los colegios de La Gomera.

La Gomera es una de las siete islas Canarias (España), su capital es San Sebastián de La Gomera y, como parte occidental del archipiélago, pertenece a la provincia de Santa Cruz de Tenerife. Es una de las islas menos pobladas del archipiélago canario con 21.136 habitantes (2018), una de las razones por las que se ha decidido enseñar el silbo gomero en las escuelas, a fin de que los más jóvenes mantengan el dialecto.

Hasta el momento, pocos son los estudios que han tomado como objeto de investigación este particular dialecto de la isla de La Gomera. Sin embargo, hace unos años, Carreiras et al. (2005) llevaron a cabo un estudio con resonancia magnética funcional (Fmri) en 6 sujetos. Concretamente, se dividió la muestra en un grupo de Silbadores y otro de No silbadores (grupo control), siendo sometidos ambos grupos a tareas de comprensión en *silbo gomero* y en español, con el fin de conocer qué áreas del cerebro se activaban en el grupo de Silbadores durante las tareas de comprensión con *silbo gomero*. Los resultados obtenidos mostraron una activación de regiones temporales comúnmente asociadas a las lenguas habladas. Concretamente, se encontró activación de la parte posterior del giro temporal superior izquierdo, así como de regiones mediales y superiores del lóbulo temporal derecho cuando los participantes silbadores eran expuestos a los bloques de comprensión del silbo. Así, se concluyó que las regiones del lóbulo temporal encargadas del procesamiento del lenguaje hablado también participan en el procesamiento del *silbo gomero* en sujetos silbadores.

En el presente estudio, se pretende ahondar aún más en dichas conclusiones utilizando un mayor número de sujetos y, además, conocer qué áreas del cerebro se activan a la hora de producir el *silbo gomero*. Para comprobarlo, se llevó a cabo un estudio con



Fmri en 21 sujetos a los que, mientras se encontraban en la máquina de fMRI, se les aplicó un diseño de bloques (5 bloques de imágenes que ellos debían nombrar en español y otros 5 bloques, en silbo gomero) siendo la duración de cada bloque de 15 segundos. Por lo tanto, la hipótesis de esta investigación es que, en la producción del *silbo gomero*, se activan áreas similares a las que se activan en los mismos sujetos cuando realizan tareas de producción en español.

MÉTODO

Participantes

La muestra utilizada estaba compuesta por 21 sujetos, donde 14 eran hombres y 7 eran mujeres (todos ellos hispanoparlantes y silbadores). La edad media de la muestra es 27,05 años; con edades comprendidas entre los 12 y los 60 años. La preferencia manual de toda la muestra es la mano derecha, por lo que se entiende que el hemisferio izquierdo será el dominante y, por lo tanto, el encargado del lenguaje, en su mayor parte.

Tabla 2

Características de la muestra

Sujetos	Género	Edad de la muestra	Lateralidad manual
N=21	14 Hombres, 7 Mujeres	Media= 27,05 DT= 13,45	Diestra

Instrumentos

Para nuestro estudio, el tutor nos proporcionó una base de datos compuesta por imágenes de Resonancia Magnética funcional (fMRI) pertenecientes a cada uno de los participantes de la investigación.

La Resonancia Magnética es una técnica no invasiva en la cual se utilizan campos magnéticos y ondas de radio. En primer lugar, se hacen llegar ondas al interior del organismo, estas ondas son procesados por un ordenador que analiza los cambios producidos en la estructura de la onda que se envió. Esto nos da información de lo que se ha encontrado a su paso para obtener imágenes detalladas de los diferentes órganos del cuerpo.

Una de sus aplicaciones es la ya nombrada Resonancia Magnética Funcional (fMRI). Para poder adquirir imágenes mediante esta técnica se utiliza la señal BOLD (blood oxygen-level dependent), que mide el nivel de oxígeno en sangre como consecuencia de la actividad neuronal. La adquisición de estas imágenes se efectúa durante la realización de una actividad que consta de una parte denominada ‘tarea’ en la que se produce activación y otra de reposo. A continuación, se comparan las imágenes obtenidas durante las dos partes de la actividad y se mide la señal de cada voxel para determinar si ha existido una variación de activación en el área a analizar, generando un mapa de la actividad cerebral (Álvarez, Ríos, Hernández, Bargalló y Calvo-Medina, 2008).

Las imágenes fueron procesadas por los programas FSL, ICA_AROMA y Surf Ice.

- ICA-AROMA (Pruim et al., 2015): es un programa que tiene como objetivo el eliminar las variaciones de la señal producidas por el movimiento de cabeza de los participantes dentro de la máquina de resonancia magnética, debido a que dicho movimiento podría inducir a hallazgos falsos. Las técnicas que usó el programa fueron consideradas de eliminación o barrido. De esta manera, se utilizó el programa para reducir los artefactos producidos por el movimiento y aumentar la fiabilidad de los resultados obtenidos.
- FSL (Smith et al., 2001): se trata de una biblioteca de herramientas de análisis para datos de imágenes cerebrales funcionales, estructurales y de resonancia magnética. Dicho programa fue utilizado para realizar un análisis GLM de los cuatro contrastes (“Silbo”, “Spanish”, “Silbo-Spanish”, “Spanish-Silbo”). Además, se realizó un quinto análisis aplicando el método *conjunctions*, cuyo propósito era detectar áreas, con un efecto significativo y ninguna diferencia significativa, en las condiciones “Silbo” y “Spanish”.
- Surf Ice: es una herramienta que genera imágenes de las superficies del córtex cerebral con superposiciones, para generar conexiones de red, atlas anatómicos, tractografías y mapas estadísticos. Este programa se utilizó para desarrollar las imágenes 3D de los voxels activados que se adjuntan posteriormente.

Diseño

El diseño utilizado fue un diseño experimental de bloques, compuesto por 5 bloques de imágenes que debían nombrar en español, y otros 5 bloques que debían nombrar en silbo gomero. Cada bloque tenía una duración de 15 segundos y, entre cada bloque, había un periodo de 12 segundos en el que no se mostraba nada a los sujetos (dichos periodos se denominarán “Gaps”). A fin de evitar el posible efecto del aprendizaje o de

las expectativas sobre el desempeño de la tarea, la presentación de los bloques (tanto de los de español como de los de silbo) se hizo de forma aleatoria para cada sujeto.

En la imagen 1, se puede observar un ejemplo del diseño utilizado. Como se puede apreciar, antes de cada bloque, se informa al sujeto en qué idioma debe nombrar las imágenes que se le van a presentar a continuación (se le muestra “Silbo” o “Español”, en cada caso). A continuación, se le presentan 3 imágenes en cada bloque. Cada imagen se mues-

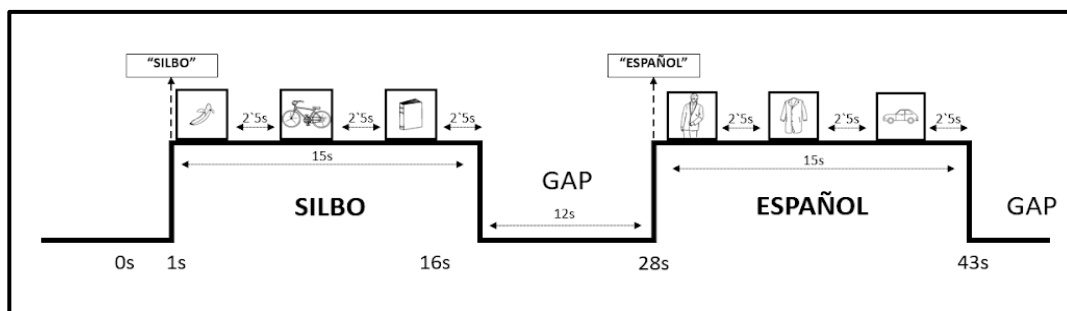


Figura 1. Ejemplo del diseño de bloques utilizado.

tra durante 2,5 segundos y, entre imágenes, transcurren otros 2,5 segundos. Una vez finalizado el bloque, al sujeto no se le presenta ningún estímulo durante 12 segundos; pasado ese tiempo, comienza un nuevo bloque de nombrado.

Este diseño fue aplicado mediante unas gafas de realidad virtual. De esta manera, los participantes podían ver en todo momento lo que se proyectaba en la pantalla del ordenador mientras se encontraban en la máquina de fMRI (obteniendo así imágenes de su cerebro durante la realización de la tarea).

ANÁLISIS

Preprocesamiento

Antes de realizar el análisis de los datos, fue necesario realizar un preprocesamiento de los datos puros obtenidos con la técnica de fMRI. Para ello, se utilizaron diversos paquetes de análisis incluidos en el programa FSL (Smith et al., 2001). Así, en primer lugar, se utilizó MCFLIRT (Jenkinson, Bannister, Brady & Smith, 2002) para reducir el ruido ocasionado por el movimiento de los sujetos durante el experimento. Concretamente, el programa escoge una de las imágenes obtenidas durante la tarea y la usa de modelo. Esto quiere decir que toma como referencia dicha imagen y, en base a ella, gira y desplaza el resto de las imágenes para que se ajusten en la medida de lo posible al modelo (respetando siempre la forma, el tamaño y las proporciones de las imágenes obtenidas).

Tras esto, con el objetivo de reducir aún más las variaciones de la señal producidas por el movimiento de cabeza de los participantes dentro de la máquina de resonancia magnética, se aplicó un suavizado de 5mm (*spatial smoothing*) del movimiento que presentaban las imágenes de algunos sujetos durante la tarea. La intención de aplicar este suavizado es evitar que el movimiento de los sujetos pueda conducir a error a la hora de interpretar la señal BOLD obtenida, pues el correlato neural de un mismo voxel no sería el mismo si un sujeto se ha movido durante la tarea. Hay que resaltar que, aplicando esta técnica, en las imágenes resultantes se eliminan posibles pequeños efectos presentes en los datos en bruto. Sin embargo, dado que el propósito de esta investigación es buscar efectos de gran tamaño, los pequeños efectos que desaparecen no influirán en el objetivo de este estudio. Este suavizado se aplicó para cada uno de los sujetos por separado.

Por último, se utilizó el paquete ICA-AROMA (Pruim et al., 2015), con el fin de encontrar y eliminar *artefactos* (a causa del movimiento) que influirían en la interpretación y la validez de los datos. Este tipo de análisis identifica las variaciones en la señal que surgen como consecuencia del movimiento de los sujetos dentro de la máquina de resonancia magnética, y las elimina utilizando una regresión lineal.

Posteriormente, para poder comparar los datos obtenidos para cada sujeto, se normalizaron las imágenes obtenidas utilizando una plantilla standard (MNI 152), transformando las coordenadas de la imagen original al espacio anatómico común. Este proceso se realizó utilizando el programa FSL (Smith et al., 2001).

Análisis estadístico

El propósito de este estudio era averiguar qué zonas del cerebro se activaban tanto en la producción oral de español como en la producción del Silbo Gomero. Con este fin, se llevaron a cabo dos fases dentro del análisis estadístico de los datos: un primer análisis de los datos obtenidos para cada sujeto (análisis intrasujeto) en las condiciones de Silbo y Español, y un análisis GLM de los cuatro contrastes (análisis intragrupo): “Silbo”, “Spanish”, “Silbo-Spanish”, “Spanish-Silbo”. Una vez realizados los contrastes mencionados, aplicamos un análisis *conjunctions* con el fin de detectar áreas con un efecto significativo, y ninguna diferencia significativa, en las condiciones “Silbo” y “Spanish”.

1. Análisis intrasujeto

En primer lugar, los datos de cada participante fueron analizados de forma individualizada. Para detectar las posibles variaciones, utilizamos en el análisis un Modelo Lineal General (GLM), en el que la respuesta BOLD es la variable dependiente y la variación temporal esperada de la respuesta BOLD la variable independiente (Poldrack, Mumford & Nichols, 2011).

Respecto a la respuesta BOLD esperada, un modelo “double-gamma HRF” fue utilizado. Este modelo tiene en cuenta la posible sobrecompensación y/o infraestimación de la respuesta. Así, este modelo es comparado con las respuestas BOLD reales obtenidas para cada sujeto durante la tarea. El umbral mínimo para cada voxel fue $Z > 2.3$

2. Análisis intragrupo

En este punto se realizó un análisis GLM de los cuatro contrastes, comparando en cada uno de ellos a todos los sujetos del grupo. Se utilizó un *modelo de efectos mixtos*, y la puntuación típica resultante (mostrada en las tablas 3 y 4) muestra la consistencia entre la respuesta BOLD real y la esperada. Los cuatro contrastes resultantes fueron:

- Contraste nº1: “Silbo”. El resultado de este análisis era la respuesta BOLD “media” de todos los sujetos durante los bloques de producción en Silbo.
- Contraste nº2: “Spanish”. El resultado de este análisis era la respuesta BOLD “media” de todos los sujetos durante los bloques de producción en Español.

- Contraste nº3: “Silbo-Spanish”. En este análisis se restaba a la respuesta BOLD de todos los sujetos en la condición de SILBO, la respuesta BOLD de todos los sujetos durante los bloques de producción en Español. De esta forma, el análisis realizado se ajustaría a la siguiente fórmula: Silbo - (Spanish).

- Contraste nº4: “Spanish-Silbo”. En este análisis se restaba a la respuesta BOLD de todos los sujetos en la condición de Español, la respuesta BOLD de todos los sujetos durante los bloques de producción en Silbo. De esta forma, el análisis realizado se ajustaría a la siguiente fórmula: Spanish- (Silbo).

3. *Conjunctions*

Este análisis resalta aquellas zonas activadas en ambas condiciones (“Silbo” y “Spanish”), basándose en el valor mínimo de activación al comparar los voxels en ambos contrastes. Este análisis se llevó a cabo también con el programa FSL.

RESULTADOS

Tras realizar los análisis ya citados, en la condición “Silbo” se encontraron 5 clusters (tabla 3). Así, el mayor de estos clusters (voxels= 18597; $z=5.78$; $p<.001$) engloba principalmente al Giro Postcentral izquierdo y al Giro Precentral derecho. El otro gran cluster (voxels= 4241; $z=5.71$; $p<.001$) se sitúa principalmente en el Giro Angular izquierdo. El resto de los clusters son de menor tamaño, y abarcan áreas como el Giro Frontal Inferior derecho o el tálamo.

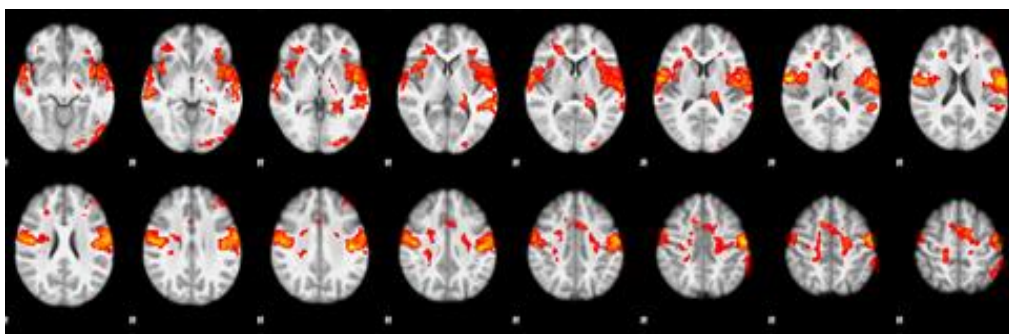


Figura 2. Áreas cerebrales activadas durante la condición ‘Silbo’.

Tabla 3

Características de los clusters obtenidos para el análisis de la condición “Silbo”. Se presentan los clusters hallados, con su tamaño correspondiente (voxels), el punto de mayor activación en cada cluster, su probabilidad asociada y sus coordenadas, y el correlato neuroanatómico subyacente a dicho cluster.

Index	Size	Z	P	X	Y	Z	Region
1	18597	5.78	0	-44	-20	32	-Left Postcentral Gyrus -Right Precentral Gyrus
2	4241	5.71	2.13e-17	20	-60	-32	- Left Angular Gyrus
3	731	3.88	0.000219	-52	-56	54	-Left Postcentral Gyrus
4	582	3.87	0.00146	22	36	8	-Right Inferior Frontal Gyrus
5	486	4.44	0.00538	-14	-24	14	-Left Thalamus

En cuanto a la condición “Spanish” (tabla 4), se encontraron dos clusters. El más grande (voxels= 56196; z=6.85; p<.001) abarca áreas que van desde el Área Motora Suplementaria (izquierda) hasta el Giro Occipital Fusiforme. El otro cluster (voxels= 437; z=4.16; p<.05) se sitúa sobre zonas del Giro Temporal Inferior (izquierdo).

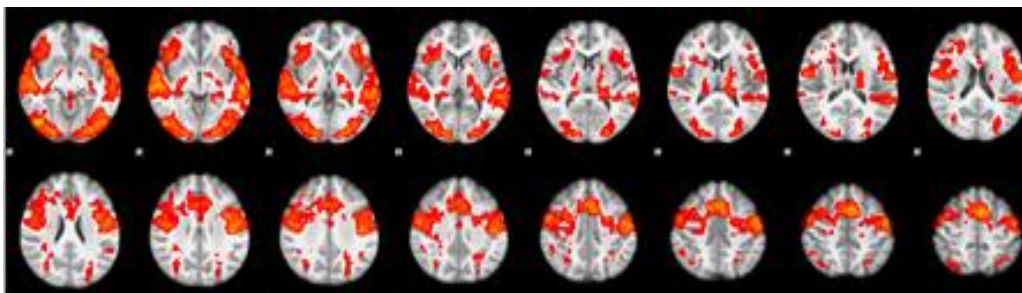


Figura 3. Áreas cerebrales activadas durante la condición ‘Spanish’.

Tabla 4

Características de los clusters obtenidos para el análisis de la condición “Spanish”. Se presentan los clusters hallados, con su tamaño correspondiente (voxels), el punto de mayor activación en cada cluster, su probabilidad asociada y sus coordenadas, y el correlato neuroanatómico subyacente a dicho cluster.

Index	Size	Z	P	X	Y	Z	Region
1	56196	6.85	0	-2	2	66	-Left Supplementary Motor Area -Left Occipital Fusiform Gyrus
2	437	4.16	0.0289	32	-10	-50	-Right Inferior Temporal Gyrus

El tercer análisis realizado fue el de la resta de las condiciones “Silbo -Spanish” (tabla 5). Se encontró aquí un primer cluster, cuyos voxels de mayor activación corresponden con zonas del Giro Postcentral derecho (voxels= 3532; $z=4.67$; $p<.001$). El segundo cluster encontrado es más pequeño que el primero, y sus voxels se sitúan sobre zonas del Giro Precentral izquierdo.

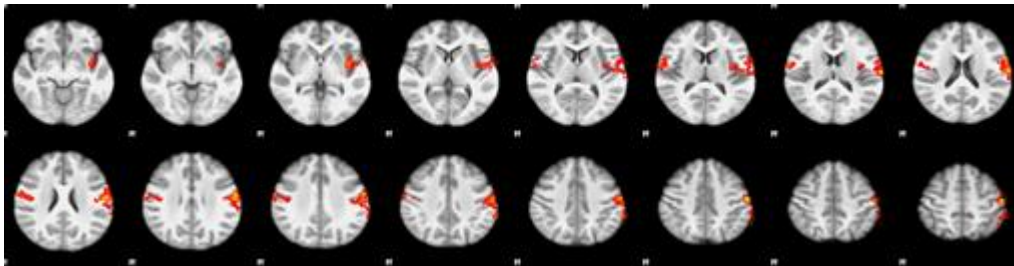


Figura 4. Áreas cerebrales activadas durante la condición ‘Silbo’ - ‘Spanish’.

Tabla 5

Características de los clusters obtenidos para el análisis de la condición “Silbo-Spanish”. Se presentan los clusters hallados, con su tamaño correspondiente (voxels), el punto de mayor activación en cada cluster, su probabilidad asociada y sus coordenadas, y el correlato neuroanatómico subyacente a dicho cluster.

Index	Size	Z	P	X	Y	Z	Region
1	3532	4.67	1.2e-14	-60	-12	44	-Right Postcentral gyrus
2	599	3.69	0.0017	64	-8	14	-Left Precentral gyrus -Central Opercular Cortex

Se realizó un cuarto análisis restando las condiciones “Spanish” – “Silbo” (tabla 6). En este análisis se encontraron 5 clusters que abarcan diversas zonas del cerebro. El más grande de ellos tiene su punto de mayor activación en el Giro Occipital Fusiforme derecho (voxels= 25577; $z=5.27$; $p<.001$) y se extiende por todo el Córtez Occipital. Otro clúster de menor tamaño se sitúa en los lóbulos frontales, teniendo su punto de mayor activación en el Giro Paracingulado derecho (voxels= 5138; $z=4.7$; $p<.001$) y extendiéndose por el Giro Frontal Superior de ese mismo lóbulo.

Otros dos clusters más pequeños se encontraron en dicho análisis. Uno de ellos se extendía por los Giros Frontales Inferior y Medio del hemisferio derecho, teniendo su punto de mayor activación en el Giro Frontal Medio (voxels= 856; $z=3.92$; $p<.001$). El otro cluster se extiende por el Cerebelo (voxels= 849; $z=3.51$; $p<.001$).

Un último clúster de menor tamaño se extiende alrededor del Giro Angular izquierdo (voxels= 599; $z=3.69$; $p<.01$).

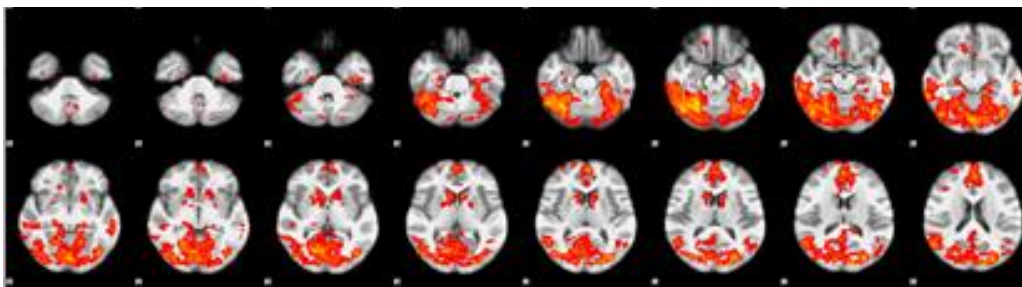


Figura 5. Áreas cerebrales activadas durante la condición ‘Spanish’ - ‘Silbo’.



Tabla 6

Características de los clusters obtenidos para el análisis de la condición “Spanish-Silbo”. Se presentan los clusters hallados, con su tamaño correspondiente (voxels), el punto de mayor activación en cada cluster, su probabilidad asociada y sus coordenadas, y el correlato neuroanatómico subyacente a dicho cluster.

Index	Size	Z	P	X	Y	Z	Region
1	25577	5.27	0	26	-56	-20	-Right Occipital Fusiform Gyrus -Left Occipital Cortex
2	5138	4.7	3.29e-19	2	52	16	-Right Paracingulated Gyrus - Right Superior Frontal Gyrus
3	856	3.92	8.06e-5	42	16	34	- Right Middle Frontal Gyrus - Right Inferior Frontal Gyrus
4	849	3.51	8.72e-5	6	-66	-56	-Cerebellum
5	599	3.69	0.0017	64	-8	14	-Left Angular Gyrus

Se realizó un quinto análisis aplicando el método conjunctions, cuyo propósito era detectar áreas, con un efecto y ninguna diferencia significativos, en las condiciones “Silbo” y “Spanish”. Al analizar los datos, se encontró que, tanto en la condición “Spanish” como en “Silbo”, había activación en varias zonas del cerebro. Esto daba lugar a la formación de cuatro clusters.

El cluster nº1 (voxels=11925; z=5.71; p<.001) tenía su punto de mayor activación en el Área Motora Suplementaria Izquierda y se extendía hacia el Área de Brocca y hacia áreas del Giro Precentral y el Giro Post Central en ambos hemisferios.

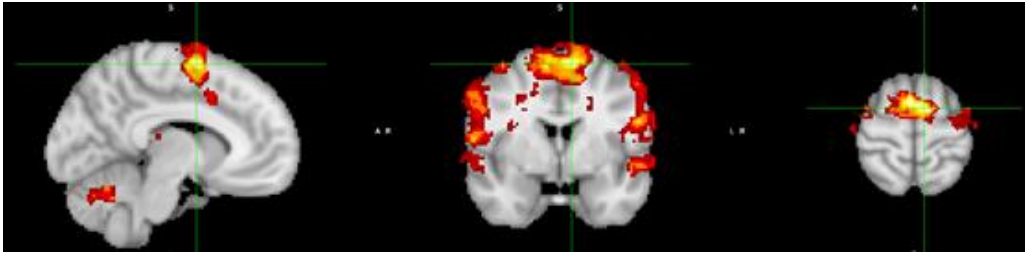


Figura 6. Z-Max del cluster n°1 (conjunctions).

El cluster n°2 (voxels=3995; $z=4.72$; $p<.001$) abarcaba diversas zonas del Cerebelo. El cluster n°3 (voxels=345; $z=3.43$; $p<.05$) se extendía por el Giro Frontal Medio y zonas del Cíngulo. El cluster n°4 (voxels=337; $z=3.95$; $p<.05$) tenía su mayor activación en el Hipocampo Izquierdo y se extendía por regiones temporoccipitales.

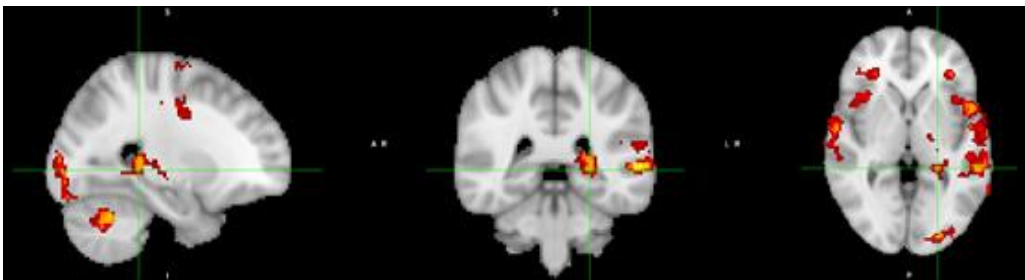


Figura 7. Z-Max del cluster n°2 (conjunctions).

Tabla 7

Características de los clusters obtenidos para el análisis conjunctions. Se presentan los clusters hallados, con su tamaño correspondiente (voxels), el punto de mayor activación en cada cluster, su probabilidad asociada y sus coordenadas, y el correlato neuroanatómico subyacente a dicho cluster.

Index	Size	Z	P	X	Y	Z	Region
1	11925	5.71	4.2e-36	49	63	68	-Left Supplementary Motor Area -Broca's Area -Left Precentral Gyrus - Left Postcentral Gyrus
2	3995	4.72	1.16e-16	51	32	21	-Cerebellum



3	345	3.43	0.0427	32	78	47	-Middle Frontal Gyrus -Cingulate Cortex
4	337	3.95	0.0483	57	44	36	- Left Hippocampus -Temporooccipital cortex

Con el fin de obtener una visión global y tridimensional de los resultados, se utilizó el programa Surf Ice para representar un modelo de los clusters obtenidos para este último análisis. Con este fin, se adjuntan las figuras 8 y 9.

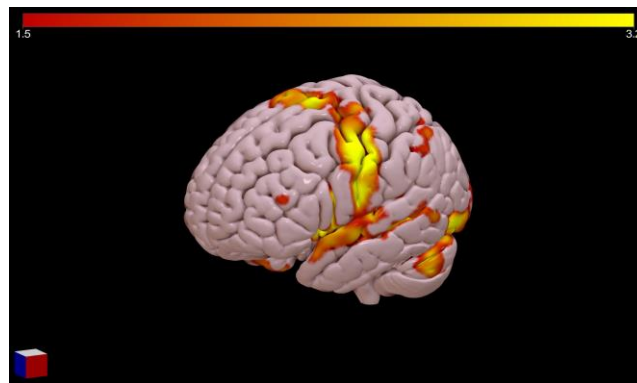


Figura 8. Visión 3D de las *conjunctions*.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

El objetivo de nuestro estudio era comprobar si, al realizar una tarea de producción verbal de manera oral en español, se activaban las mismas áreas cerebrales que al realizar la misma tarea utilizando el Silbo Gomero. Se esperaba encontrar que, efectivamente, se produciría activación de áreas cerebrales relacionadas con el lenguaje en ambas condiciones.

Para ello, se creó un diseño de bloques que los 21 participantes debieron seguir mientras se tomaban imágenes con Resonancia Magnética Funcional. Cuando se tuvieron las imágenes de cada participante se realizó, mediante el programa ICA-AROMA, una limpieza de los datos, ya que había que eliminar las posibles variaciones de la señal producidas por el movimiento de la cabeza de los participantes. A continuación, se realizó un análisis GLM mediante el programa FSL. Este análisis tenía como objetivo comparar

los distintos contrastes (“Silbo”, “Spanish”, “Silbo-Spanish”, “Spanish-Silbo”). Además, se realizó un quinto análisis aplicando el método *conjunctions* para comparar las áreas significativamente activadas en las condiciones de “Silbo” y de “Spanish”. Por último, con el programa Surf Ice se creó un cerebro en 3D grupal con los resultados de este último análisis.

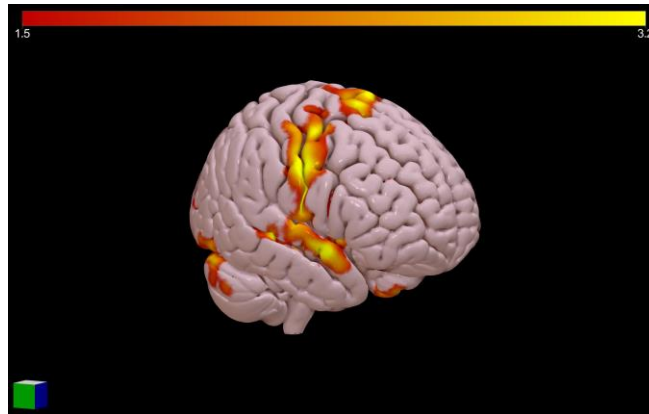


Figura 9. Visión 3D de las *conjunctions*.

Se observó que durante la condición de “Silbo” las áreas que sufrieron más activación fueron los giros postcentral izquierdo y precentral derecho, el giro angular izquierdo, el giro frontal inferior derecho y el tálamo. Durante la condición de “Spanish”, se activaron principalmente: el área motora suplementaria izquierda, el giro occipital fusiforme y el giro temporal inferior izquierdo. Y, por último, durante la comparación de las dos condiciones se comprobó que las áreas que se activaron en ambas condiciones fueron: el área motora suplementaria izquierda, el área de Broca, el giro precentral y postcentral bilateral, el cerebelo, el giro frontal medio, el cíngulo y el hipocampo izquierdo.

Los resultados obtenidos corroboran la hipótesis inicial ya que, durante la comparación de los contrastes, se observó activación de las áreas cerebrales que esperábamos, en ambas condiciones, durante la tarea de producción. Es decir, durante la producción oral en español y durante la producción en Silbo Gomero hubo activación de áreas cerebrales que se relacionan con el lenguaje. Además de las áreas relacionadas con la producción oral, como el giro temporal inferior, el área motora suplementaria o el cíngulo, áreas que también evidenció Cabrales (2015) en su investigación, hubo activación de áreas re-



lacionadas con la articulación, la comprensión y la generación de palabras, como el cerebro (Nieto, Wollman & Barroso, 2004). Igualmente se encontró activación de áreas relacionadas con el procesamiento del lenguaje auditivo; el giro temporal y áreas adyacentes y el giro frontal inferior (Cabrales, 2015). Esto podría deberse a que, durante la realización de la prueba, cuando se encontraban dentro de la máquina de resonancia magnética, se escuchaban a ellos mismos ya fuera de manera oral o mediante el silbo.

Dentro de la poca cantidad de estudios sobre este tema, destaca el estudio de *Carreras et al. (2005)*, sobre la comprensión del silbo gomero utilizando fMRI. Dicho estudio, aunque difiere del presente en cuanto a temática y tamaño muestral, obtuvo conclusiones llamativas y relevantes para el estudio que se expone en este documento. Así, concluyeron que las regiones del lóbulo temporal encargadas del procesamiento del lenguaje hablado también participan en el procesamiento del *silbo gomero* en sujetos silbadores. Por último, hay que recalcar que ambas investigaciones resaltan la activación de áreas similares a la hora de realizar tareas de comprensión y/o producción tanto en español como en silbo gomero.

Son muchas las investigaciones que se han centrado en investigar otras formas de lenguaje, demostrando que no se puede considerar sólo el lenguaje oral como el único tipo de lenguaje. Datos a favor de esta idea se han encontrado en la lengua de signos, donde se ha observado activación en áreas relacionadas con la producción del lenguaje oral durante la producción de este sistema de comunicación tan particular (Neville et al., 1998). Además, *Petitto et al. (2000)* comprobaron que a personas sordas hablantes de lengua de signos se les activaban áreas clave del cerebro que se relacionan con el lenguaje. Concretamente, se observó activación de la corteza frontal inferior izquierda (área de Broca y regiones subyacentes, encargadas de la producción) cuando los participantes produjeron signos, y del plano temporal bilateral (área de Wernicke, encargada de la comprensión) cuando veían signos o partes sin significado.

Para concluir, resaltar la necesidad de seguir aportando datos al respecto, que puedan aportar mayor fiabilidad y validez a las conclusiones aquí planteadas. Teniendo esta idea como guía, sería recomendable realizar estudios similares con muestras mayores de



silbadores. De igual forma, podría ser interesante realizar investigaciones en las que se tomarán imágenes durante tareas tanto de producción como de comprensión, en silbadores diestros y zurdos, con el fin de corroborar si la distribución neural del lenguaje se da por igual en ambos hemisferios para el silbo gomero.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, J., Ríos, L., Hernández, J. A., Bargalló, N. y Calvo-Merino, B. (2008). Resonancia Magnética I. Resonancia Magnética Funcional. En F. Maestú, M. Ríos Lago y R. Cabestrero (coord.), *Neuroimagen. Técnicas y procesos cognitivos* (pp. 33-70). Barcelona: Elsevier Masson.
- Andalucía, E. (2002). Dominancia hemisférica para el lenguaje y resonancia magnética funcional: comparación de tres tareas. *Rev Neurol*, 35(2), 115-118.
- Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2016). Área cerebral del lenguaje: una reconsideración funcional. *Rev Neurol*, 62(03), 97-106.
- Bear, M. (2008). Lenguaje. En M. Bear (coord.), *NEUROCIENCIA La exploración del cerebro* (pp. 741-772). Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins.
- Cabrales, A. (2015). Neuropsicología y la localización de las funciones cerebrales superiores en estudios de resonancia magnética funcional con tareas. *Acta Neurológica Colombiana*, 31(1), 92-100.
- Cuenod, C. A., Bookheimer, S. Y., Hertz-Pannier, L., Zeffiro, T. A., Theodore, W. H., & Le Bihan, D. (1995). Functional MRI during word generation, using conventional equipment: a potential tool for language localization in the clinical environment. *Neurology*, 45(10), 1821-1827.
- Cunillera, T. y Rodríguez-Fornells, A. (2008). Lenguaje I. En F. Maestú, M. Ríos Lago y R. Cabestrero (coord.), *Neuroimagen. Técnicas y procesos cognitivos* (pp. 413-430). Barcelona: Elsevier Masson.



- Gernsbacher, M. A., & Kaschak, M. P. (2003). Neuroimaging studies of language production and comprehension. *Annual review of psychology*, 54(1), 91-114.
- Hickok, G., Bellugi, U., & Klima, E. S. (1998). The neural organization of language: evidence from sign language aphasia. *Trends in cognitive sciences*, 2 (4), 129-136.
- Hickok, G., Bellugi, U., & Klima, E. S. (1998). What's right about the neural organization of sign language? A perspective on recent neuroimaging results. *Trends in Cognitive Sciences*, 2 (12), 465-468.
- Jenkinson, M., Bannister, P., Brady, M., & Smith, S. (2002). Improved optimization for the robust and accurate linear registration and motion correction of brain images. *Neuroimage*, 17(2), 825-841.
- Jenkinson, M., Beckmann, C. F., Behrens, T. E., Woolrich, M. W. & Smith, S. M. (2012). FSL. *NeuroImage*, 62 (2), 782-790.
- Moyano, M. J. J. (2012). Las lenguas de signos: su estudio científico y reconocimiento legal. *Anuari de filologia. Estudis de lingüística*, (2), 33-48.
- Neville, H. J., Bavelier, D., Corina, D., Rauschecker, J., Karni, A., Lalwani, A., & Turner, R. (1998). Cerebral organization for language in deaf and hearing subjects: biological constraints and effects of experience. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95 (3), 922-929.
- Newman, A. J., Supalla, T., Hauser, P. C., Newport, E. L., & Bavelier, D. (2010). Prosodic and narrative processing in American Sign Language: An fMRI study. *Neuroimage*, 52 (2), 669-676.
- Nieto, A., Wollman, T., & Barroso, J. (2004). Cerebellum and cognitive processes. *Anales De Psicología / Annals of Psychology*, 20(2), 205-221.



- Petitto, L. A., Zatorre, R. J., Gauna, K., Nikelski, E. J., Dostie, D. y Evans, A. C. (2000). Actividad cerebral similar a un discurso en personas sordas que procesan lenguajes de señas: implicaciones para la base neuronal del lenguaje humano. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias*, 97 (25), 13961-13966.
- Pruim, R. H. R., Mennes, M., van Rooij, D., Llera, A., Buitelaar, J.K. & Beckmann, C.F. (2015). ICA-AROMA: A robust ICA-based strategy for removing motion artifacts from fMRI data.
- Smith, S., Bannister, P. R., Beckmann, C., Brady, M., Clare, S., Flitney, D., Hansen, P., Jenkinson, M., Leivovici, D., Ripley, B., Woolrich, M. & Zhang, Y. (2001). FSL: New tools for functional and structural brain image analysis. *NeuroImage*, 13(6), 249.