

Cuantificación de errores de posicionado de electrodos electroencefalográficos

Rosa Pàmies-Vilà¹, Albert Fabregat-Sanjuan², Aina Ros-Alsina³, Vicenç Pascual-Rubio⁴

¹ BIOMECH, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Politècnica de Catalunya, España.
Email: rosa.pamies@upc.edu

² FUNCMAT, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universitat Rovira i Virgili, España. Email: a.fabregat@urv.cat

³ TFM, Máster universitario en Neuroingeniería y Rehabilitación, Universitat Politècnica de Catalunya, España.
Email: aina.ros@estudiantat.upc.edu

⁴ NEUROEPIA, Insitut d'investigació Sanitària Pere Virgili. Departamento de Neurofisiología Clínica, Hospital Sant Joan de Reus, España. Email: vicenc.pascual@salutsantjoan.cat

Resumen

Los intercambios bioquímicos entre las neuronas del cerebro producen una pequeña actividad eléctrica detectable con la colocación de electrodos en el cuero cabelludo. En los últimos años están apareciendo técnicas de estimulación cerebral no invasiva que, basándose en la neuromodulación, permiten tratar patologías como el dolor o la depresión. Una de las regiones diana donde suelen aplicarse estas técnicas es el córtex dorsolateral prefrontal (DLPFC) y, el resultado de estos procedimientos depende de la correcta y precisa localización del punto del cuero cabelludo cercano a dicha región. Este estudio hace una revisión de los artículos publicados para evaluar las discrepancias en la localización en el DLPFC y cuantificar las diferencias entre distintos autores. Por otro lado, el estudio también cuantifica diferencias entre unas posiciones de referencia (en una cabeza realista) y los resultados de aplicar el posicionado del sistema internacional 10-20 en dos modelos de cabeza MNI152 y en un modelado de cabeza con un elipsoide.

Palabras clave: 10/20; EEG; neurología; posicionamiento EEG.

Abstract

Biochemical exchanges between neurons in the brain produce a small electrical activity detectable with the placement of electrodes on the scalp. In recent years, new non-invasive brain stimulation techniques are appearing which, based on neuromodulation, allow the treatment of pathologies such as pain or depression. One of the target regions where these techniques are usually applied is in the dorsolateral prefrontal cortex (DLPFC) and the result of these procedures depends on the correct and precise location of the point on the scalp close to this region. This study reviews the published articles to evaluate the discrepancies in the location in the DLPFC and quantify the differences between different authors. On the other hand, the study also quantifies differences between reference positions (in a realistic head) and the results of applying the international 10-20 electrode system placement in two MNI152 head models and in a head modelled as an ellipsoid.

Keywords: 10/20; EEG; neurology; EEG electrode placement

1. Introducción

Los intercambios bioquímicos entre las neuronas de nuestro cerebro se realizan en las sinapsis y producen una pequeña actividad eléctrica detectable con la colocación de electrodos en el cuero cabelludo mediante técnicas diagnósticas de registro neurofisiológicas como la electroencefalografía (EEG)

o los potenciales evocados (PE). A parte, en los últimos años ha crecido el interés científico por las técnicas de estimulación cerebral no invasiva que, mediante la neuroplasticidad, permiten el tratamiento de patologías como el dolor o la depresión.

El sistema internacional 10-20 (SI 10/20) [1] es un método ampliamente utilizado para distribuir los

electrodos en la superficie craneal que garantiza la reproducibilidad de las pruebas de registro y de tratamiento electrofisiológico y correlaciona las ubicaciones externas del cráneo con las áreas corticales subyacentes. Este sistema parte de la identificación de cuatro puntos de referencia craneales universales: Nasion, Inion y ambos puntos pre-auriculares (tragus), LPA y RPA (siglas del inglés left pre-auricular y right pre-auricular points). El sistema prevé un método para distribuir los electrodos sobre la superficie de la cabeza proporcionalmente a las distancias Nasion-Inion y Tragus-Tragus.

La EEG es una de las pruebas neurofisiológicas que requiere de más electrodos de registros distribuidos en la superficie craneal y permite el estudio funcional del cerebro. Clínicamente se suele indicar en los trastornos de la conciencia, en la epilepsia y en el control del efecto farmacológico sobre el cerebro.

Los potenciales evocados permiten estudiar las vías sensoriales y motoras mediante la estimulación y el registro bioeléctrico en el individuo. Las principales técnicas de estimulación cerebral no invasiva son la estimulación de corriente directa transcraneal (tDCS, del inglés *transcranial direct current stimulation*) y la estimulación transcraneal magnética repetitiva (rTMS, del inglés *repetitive Transcranial magnetic stimulation*).

La tDCS es una forma de neuromodulación no invasiva, simple, económica e indolora que utiliza corrientes eléctricas directas constantes y de baja intensidad administradas a través de electrodos superficiales en el cráneo, con el fin de estimular partes específicas del cerebro que modulan la excitabilidad neural espontánea. Entre sus usos más comunes se encuentra el del tratamiento de la depresión, la fibromialgia y las adicciones, pero también se utiliza en una amplia gama de otras patologías como la enfermedad de Alzheimer, la epilepsia, la esquizofrenia, la esclerosis múltiple y la enfermedad de Parkinson. También se usa con frecuencia para tratar el dolor neuropático, ya que activa las regiones del cerebro que inhiben el dolor.

La rTMS es una forma no invasiva de neuromodulación que estimula las células nerviosas del cerebro a través de las leyes de los campos magnéticos de Faraday.

La rTMS ha demostrado potencial como técnica de tratamiento en el sistema nervioso central (SNC), con una amplia aplicación en enfermedades neurológicas y de salud mental, y con investigación aún en evolución. La aplicación más común en la actualidad es el tratamiento de episodios depresivos mayores resistentes a la medicación [2].

1.1. Córtex Prefrontal Dorsolateral (DLPFC)

Los procedimientos explicados se aplican a distintas regiones del cerebro en función del objetivo que se busque. El resultado de estas técnicas dependerá de la aplicación precisa en la región específica de la corteza cerebral, por lo que es importante poder localizar con precisión estas áreas. Una de las regiones del cerebro cuya localización ha sido más estudiada por los investigadores es la corteza prefrontal dorsolateral (DLPFC). La DLPFC es un área en la corteza prefrontal del cerebro de los primates, la cual no es una estructura anatómica, sino funcional, que se encuentra en la circunvolución frontal media de los humanos, en la parte lateral de las áreas de Brodmann (BA) 9 y 46. Se ha reconocido que la corteza prefrontal dorsolateral (DLPFC), utilizada tanto para tDCS como para rTMS, está críticamente involucrada en el control cognitivo, incluido el control cognitivo sobre las emociones, así como la memoria de trabajo, la flexibilidad cognitiva y la planificación.

La DLPFC es el área de estimulación más comúnmente utilizado para el tratamiento del trastorno depresivo mayor (MDD) con rTMS [3], y también se usa típicamente para el alivio de ciertos tipos de dolor [4]. También en tDCS, la ubicación de DLPFC parece mostrar un efecto terapéutico positivo en pacientes con MDD y, además, se ha demostrado que mejora el rendimiento en varios dominios cognitivos, como las funciones ejecutivas, las habilidades verbales y el rendimiento de la memoria en sujetos sanos, pero también en pacientes con enfermedad de Parkinson y accidentes cerebrovasculares [5].

Asimismo, es importante tener en cuenta que existe una importante variabilidad en la anatomía de la cabeza, cosa que interfiere con la localización de estas áreas cerebrales. Es por eso que algunos métodos de localización tienen en cuenta la variabilidad morfológica de la cabeza para adaptar mejor la localización a cada sujeto. Los métodos más comunes que se utilizan actualmente para la localización de la DLPFC son las técnicas de neuroimagen y neuronavegación, el método de “los 5 centímetros”, el sistema internacional 10-20 y el método propuesto por Beam et al. (2009) [4] conocido como “método Beam F3”.

Teóricamente, DLPFC corresponde a la parte lateral de las Áreas de Brodmann (BA) 9 y 46. En general, se considera que DLPFC está ubicado en la parte media de las circunvoluciones frontales medias (MFG). Además, datos recientes que utilizan conectividad funcional en resonancia magnética funcional en estado de reposo han sugerido que BA46 parece ser el área funcionalmente más relevante de la DLPFC a la que se debe apuntar [6]. Los espacios de Talairach y del Instituto Neurológico de Montreal (MNI) [7] son

sistemas de coordenadas tridimensionales (también conocidos como “atlas”) del cerebro humano, que se utilizan para mapear la ubicación de las regiones del cerebro, independientemente de las diferencias individuales en el tamaño y la forma general del cerebro.

Una de las primeras heurísticas desarrolladas para la ubicación de la DLPFC y que es ampliamente utilizada, es la conocida como el “método de los 5 cm”. Este procedimiento, propuesto por George et al. (1995) y Pascual-Leone et al. (1996), define la DLPFC como 5 cm anterior al córtex motor primario.

Sin embargo, esta distancia no se ha calculado de forma fiable sobre una base de datos anatómicos controlados y no tiene en cuenta la variabilidad de la morfología de la cabeza entre sujetos. Algunos investigadores han modificado la heurística a la “regla de los 6 cm”, “5,5 cm” o incluso a la “regla de los 7 cm” sin cambios destacables en sus resultados.

El método conocido como Sistema internacional 10-20 fue establecido por Herbert H. Jasper en 1958. Este método, adoptado por la Federación Internacional de Neurofisiología Clínica, estandariza la ubicación de 21 electrodos de EEG en el cuero cabelludo. A través de algunos porcentajes de la circunferencia (ya sea 10% o 20%, de aquí el nombre del método) y distancias entre cuatro puntos de referencia anatómicos básicos, la cabeza se divide en posiciones proporcionales para ofrecer una cobertura adecuada de todas las regiones del cerebro, correlacionando de esta manera ubicaciones externas del cráneo con las áreas corticales subyacentes. Por lo tanto, este método presenta la ventaja de tener en cuenta la variabilidad en el tamaño del cráneo del paciente, ya que utiliza medidas de la cabeza para la ubicación de los electrodos. Los cuatro puntos de referencia anatómicos utilizados para realizar los cálculos porcentuales de las posiciones son el Nasion, el Inion y los puntos preauriculares izquierdo y derecho.

La ubicación del electrodo F3 de este sistema parece corresponder a la posición del DLPFC [4], por lo que muchas aplicaciones de investigación clínica utilizan esta ubicación como objetivo cuando se quieren aplicar procedimientos como la TMS a la DLPFC. Como este sistema utiliza las medidas de la cabeza, teniendo por tanto en cuenta la variabilidad en la forma de la cabeza, parece una forma precisa de localizar la DLPFC. Sin embargo, para el personal clínico con poca experiencia con el sistema 10-20, las numerosas mediciones y cálculos pueden conllevar demasiado tiempo y dan lugar a error humano.

Otro sistema utilizado para la localización de DLPFC es el presentado en el trabajo de investigación de Beam et al. (2009) [4], donde hacen la localización según el

sistema Internacional 10-20 (por lo que ubican la DLPFC en la posición F3, de aquí su nombre), pero con otra metodología para minimizar el número de cálculos basado en la distancia desde el punto preauricular izquierdo hasta el punto preauricular derecho, la distancia nasión inión y el perímetro cefálico.

Según Fox et al. (2012) [8], la ubicación encontrada por BeamF3 corresponde estrechamente con un objetivo en la DLPFC que previamente se encontró que estaba máximamente anticorrelado con la actividad cingulada subgenual en la resonancia magnética funcional en estado de reposo [3]. Dado este hallazgo, Mir-Moghtadaei et al. (2015) [9], cuantificó la discrepancia en el sitio del cuero cabelludo entre BeamF3 y la neuronavegación guiada por resonancia magnética para localizar la DLPFC izquierda, descubriendo que la longitud del arco radial desde el vértice hasta el sitio objetivo era leve, pero significativamente más larga (media de 0,35 cm) con resonancia magnética. Como resultado de este estudio, algunos investigadores comenzaron a ubicar la DLPFC con BeamF3 y luego ajustando la distancia desde el vértice agregando 0,35 cm al resultado.

Siddiqui et al. (2021) [10], desarrolló un mapa cerebral a partir de análisis independientes pero convergentes de las redes funcionales asociadas con la respuesta y la falta de respuesta a los procedimientos aplicados a la DLPFC como rTMS y descubrió que el mapa cerebral identificaba dos focos de interés en cada hemisferio (proximales a F3 y F4). Con base en este hallazgo, Mir-Moghtadaei et al. (2022) [3] modificó la heurística BeamF3 (usando la plantilla anatómica MNI ICBM152) para estimar mejor el sitio objetivo de estimulación de DLPFC, obteniendo un conjunto actualizado de heurísticas similares al método BeamF3, pero ahora localizando los sitios del cuero cabelludo más cercanos a los cuatro focos de interés encontrados por Siddiqui et al. (2021).

Ante esta controversia de métodos y propuestas, este trabajo quiere ofrecer una revisión de la localización de la zona DLPFC para comprender los problemas relacionados con la localización de áreas cerebrales y al mismo tiempo analizar la diferencia de todas las posiciones del sistema 10/20 entre dos modelos estándar y un modelo basado en un elipsoide. Los dos objetivos del trabajo son:

- Estudiar los métodos existentes para localizar la corteza prefrontal dorsolateral (DLPFC), analizando las discrepancias mostradas en la literatura a la hora de localizar esta área del cerebro.

- Analizar las diferencias entre diferentes modelos teóricos de cabeza que pretenden modelar una cabeza

humana promedio, al ubicar electrodos en el cuero cabelludo utilizando el Sistema Internacional 10-20.

1.2 Coordenadas en MNI de la DLPFC

Revisando la literatura existente se puede observar que en cada artículo se ubica la DLPFC en diferentes coordenadas. Este trabajo se enfoca en 17 artículos que proporcionan las coordenadas de la DLPFC izquierda en el Sistema de Coordenadas MNI. Además, se incluyen algunos artículos que proporcionan las coordenadas en el sistema de coordenadas de Talairach, pero que estudios posteriores convirtieron esas coordenadas al Sistema MNI.

Las coordenadas en MNI de la DLPFC izquierda proporcionadas en los artículos revisados se han colocado en orden cronológico en la Tabla 1 donde se ha especificado si las coordenadas se ajustan al atlas MNI152 (imagen del cerebro obtenido a partir de realizar la media entre 152 muestras de IRM de sujetos sanos). En caso de que se proporcionaran las coordenadas MNI ajustadas y sin ajustar al atlas, solo se han escrito en la tabla las ajustadas. También se ha especificado si las coordenadas se relacionan con la ubicación de la DLPFC del cerebro o el cuero cabelludo.

2. Metodología

3.1 Localización MNI de la DLPFC

Se desea estudiar la localización de las distintas coordenadas MNI152 para la DLPFC propuestas en la literatura y compararla con la posición determinada por el Sistema Internacional 10-20 para un modelo de cabeza realista MNI 152 (asumiendo como referencia las coordenadas de [11])

Los estudios que proporcionan ambas coordenadas (cerebrales y del cuero cabelludo) se utilizan para determinar la relación entre estas dos posiciones tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$dif(x, y, z) = \frac{\sum((x_s, y_s, z_s) - (x_b, y_b, z_b))}{N} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde (x_s, y_s, z_s) son las coordenadas del cuero cabelludo, (x_b, y_b, z_b) las del cerebro, y N es el número total de localizaciones encontradas en la literatura ($N=9$)

A partir de esta información, se extrapolan las posiciones cerebrales (x'_b, y'_b, z'_b) o del cuero cabelludo (x'_s, y'_s, z'_s) de los artículos que solo apuntaban una de las dos localizaciones:

$$(x'_s, y'_s, z'_s) = (x'_b, y'_b, z'_b) + dif(x, y, z) \quad (\text{Ec. 2})$$

Con toda la información anterior, se puede calcular la distancia euclidiana d entre las posiciones MNI de los distintos estudios (x_i, y_i, z_i) , y la de referencia (x_0, y_0, z_0) :

$$d = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Finalmente, el software Brainstorm [12] se utiliza para visualizar sobre un modelo real de cabeza en 3D ajustado al atlas MNI152 los puntos de la DLPFC, tanto las coordenadas del cuero cabelludo como las del cerebro.

3.1 Cuantificación de errores en modelos de cabeza

En la segunda parte del estudio, se utilizaron tres modelos que pretenden modelar una cabeza humana promedio. El primer modelo es el utilizado como referencia en el software brainstorm para el sistema MNI152 [12]. Este modelo de cabeza se ofrece como ejemplo para seguir los tutoriales introductorios de Brainstorm (Figura 1a). El segundo es el MNI ICBM 152 non-linear 6th Generation Symmetric Average Brain Stereotaxic Registration Model, del laboratorio de neuroimagen y tecnologías quirúrgicas de la universidad McGill [13], denominado en el presente estudio como el modelo de cabeza “MNI152 estereotáxico” (Figura 1b). El último es un elipsoide con las longitudes Ns-In y LPA-RPA iguales que el primer modelo. Para el cálculo de los radios de las elipses, se ha mantenido el ángulo utilizado en modelos esférico como el de Oostenveld, donde Nasion, Inion, LPA y RPA se sitúan 22.5° por debajo de plano del perímetro craneal (Figura 1c).

La comparación entre los dos primeros modelos de cabeza teóricos puede aclarar si los modelos de cabeza promediados obtienen diferencias pequeñas con respecto a los puntos teóricos del sistema MNIO (coordenadas de Ostenveld). El tercer modelo se ha estudiado ya que en la mayoría de los estudios existentes, cuando se quiere modelar de forma simplificada la cabeza, se hace mediante una esfera. Sin embargo, esto solo se puede utilizar para aproximaciones muy básicas porque la forma real de la cabeza no es esférica. Entonces, en el estudio actual se ha usado un elipsoide para obtener las coordenadas de los puntos del sistema 10/20 y así analizar la precisión de modelar la anatomía real de la cabeza con esta figura geométrica, lo que puede aclarar si el elipsoide puede ser usado en investigaciones futuras como modelo matemático para modelar la cabeza humana.

Tabla 1. Coordenadas proporcionadas por los artículos del estado del arte

Estudio		Atlas	MNI x	MNI y	MNI z	Superficie
<i>Rajkowska & Goldman-Rakic, 1995</i>	BA46		-44.0	40.0	29.0	Cerebro
	BA9		-36.0	39.0	43.0	Cerebro
<i>Oostenveld et al., 2001</i>		MNI152	-50.24	53.11	42.19	Cuero Cabelludo
<i>Paus et al., 2001</i>			-40.0	31.0	34.0	Cerebro
<i>Herwig et al., 2003</i>			-37.0	26.0	49.0	Cuero Cabelludo
<i>Herbsman et al., 2009</i>	“Responders”	MNI152	-46.0	23.0	49.0	Cerebro
	Scalp-site “responders	MNI152	-54.1	27.2	54.6	Cuero Cabelludo
	Nonresponders		-41.0	17.0	55.0	Cerebro
<i>Cho and Strafella, 2009</i>			-40.0	31.0	34.0	Cerebro
<i>Fitzgerald et al., 2009</i>	Cordenada cerebral	MNI152	-41.3	48.9	27.7	Brain
	Cordenada del cuero cabelludo	MNI152	-48.9	55.4	31.7	Cuero Cabelludo
<i>Rusjan et al., 2010</i>	Cordenada cerebral	MNI152	-50.0	30.0	36.0	Cerebro
	Cordenada del cuero cabelludo	MNI152	-58.4	35.1	40.2	Cuero Cabelludo
<i>Bradfield et al., 2012</i>	<i>Target</i>		-38.0	30.0	30.0	Cerebro
	<i>Operational</i>		-28.83	35.11	46.22	Cerebro
	<i>Scalp operational</i>		-35.5	44.22	55.78	Cuero Cabelludo
	<i>Stereotaxic</i>		-31.28	27.67	51.22	Cerebro
	<i>Scalp Stereotaxic</i>		-38.17	34.67	62.72	Cuero Cabelludo
<i>Fox et al., 2012</i>	Cordenada cerebral	MNI152	-39.3	46.2	27.5	Cerebro
	Cordenada del cuero cabelludo	MNI152	-49.3	54.7	32.1	Cuero Cabelludo
	Average 5 cm		-41.0	16.0	54.0	Cerebro
	Optimized TMS target		-44.0	38.0	34.0	Cerebro
<i>Mir-Moghtadaei et al., 2015</i>			-38.0	44.0	26.0	Cerebro
<i>Fried et al., 2014</i>	Cordenada cerebral	MNI152	-41.5	41.1	33.4	Cerebro
	Cordenada del cuero cabelludo	MNI152	-51.2	47.9	38.7	Cuero Cabelludo
<i>Pommier et al., 2017</i>	Ref-Mylius Left	MNI152	-40.2	42.3	28.7	Cerebro
	Prop target Left	MNI152	-45.9	36.4	25.3	Cerebro
<i>Trapp et al., 2020</i>	BeamF3	MNI152	-40.6	41.7	34.3	Cerebro
	Scalp site BeamF3	MNI152	-49.3	48.7	41.0	Cuero Cabelludo
	5.5 cm rule	MNI152	-33.6	30.8	51.1	Cerebro
	Scalp site 5.5 cm rule	MNI152	-42.0	38.5	60.0	Cuero Cabelludo
<i>Cardenas et al., 2022</i>		MNI152	-51.0	51.0	44.0	Scalp
<i>Mir-Moghtadaei et al., 2022</i>	Left anterior (LA)	MNI152	-53.0	41.0	15.0	Cerebro
	Scalp site (LA)	MNI152	-62.4	46.1	17.2	Scalp

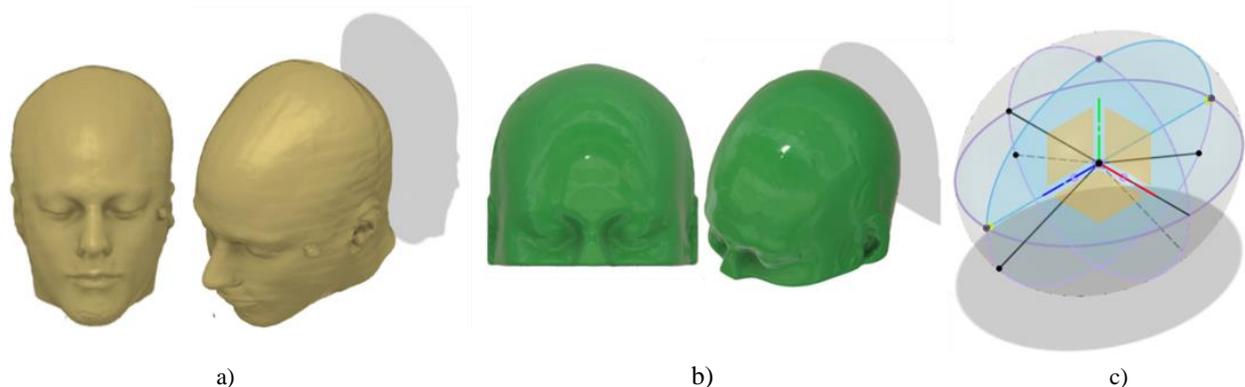


Figura 1. a) Volumen del modelo Brainstorm. b) Volumen del modelo Estereotáxico c) Volumen del modelo de elipsoide.

En el caso de estudio, se ha creado un elipse con distancias Ns-In y LPA-RPA similares a los modelos MNI152 utilizados, siendo los radios del elipsoide de 82,1 mm (LPA-RPA) y 102,5 mm (Ns-In).

En estos tres modelos de cabeza, y mediante el software Fusion360 se ubicaron las posiciones de los electrodos del sistema 10/20.

3. Resultados

4.1 Localización MNI de la DLPFC

Aplicando las ecuaciones 1-2 se ha convertido la ubicación de la DLPFC proporcionada por Oostenveld como F3 (cuero cabelludo) a coordenadas cerebrales: $MNI_x = -41,54$; $MNI_y = 46,57$; $MNI_z = 36,58$.

Se han representado sobre un modelo de cabeza las coordenadas de los electrodos proporcionados por Oostenveld comprobando que el modelo y la referencia

eran compatibles. Sobre el modelo también se han representado las ubicaciones de DLPFC que se encuentran en la literatura.

Las coordenadas que localizaron el DLPFC en el cerebro se trazaron en la corteza cerebral del modelo proporcionado por Brainstorm, mientras que las que lo localizaron en el cuero cabelludo se trazaron en la superficie del volumen de la cabeza.

Cada una de las localizaciones de la DLPFC cerebrales se pueden ver en la Figura 2a. Sin embargo, Fried et al. (2014) (azul claro en la leyenda de la Figura 2) no es visible, ya que se encuentra en el mismo lugar que el punto rosa que representa la ubicación BeamF3 de Trapp et al. (2020).

Las coordenadas del cuero cabelludo se pueden ver en la Figura 2b trazadas en la superficie de la cabeza. En este caso, Fitzgerald et al. (2009) no se puede ver (en rojo en la leyenda de la Figura 2b), ya que se encuentra en el mismo lugar que Fox et al. (2012). Lo mismo

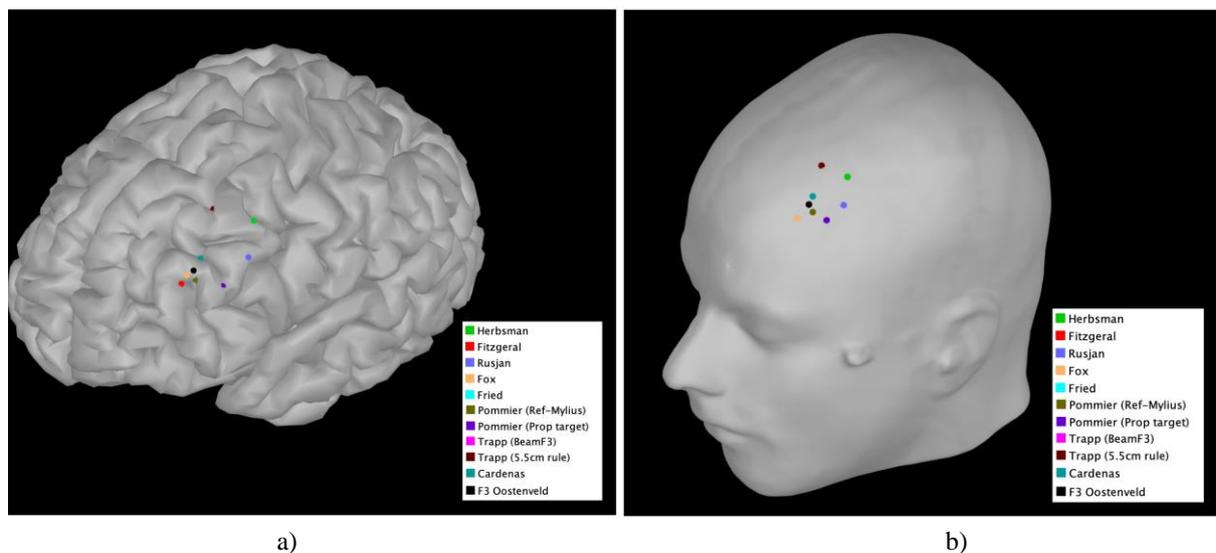


Figura 2. Coordenadas de la literatura representadas el modelo de Segmentación de Brainstorm. a) Corteza cerebral. b) Volumen craneal

ocurre con la Fried et al. (2014) y la ubicación de Trapp et al. (2020) de Beam F3 (en azul claro y rosa en la leyenda de la Figura 2b), las cuales no se observan en el cuero cabelludo, ya que están en el mismo lugar que la ubicación F3 Oostenveld (en negro).

Además de las visualizaciones presentadas, la Tabla 2 y la Tabla 3 muestran las diferencias entre estas posiciones y las de referencia (Oostenveld [11]), tanto para las coordenadas cerebrales como para las del cuero cabelludo. Las tablas también contienen la media

y la desviación estándar (DE) de estas, lo que nos muestra una distancia euclidiana media de las coordenadas cerebrales de 11,50 mm (con una DE de 8,02 mm) y de 13,32 mm (con una DE de 8,72 mm) para las coordenadas sobre el cuero cabelludo.

Analizando las coordenadas cerebrales, se puede ver que las localidades que presentan más diferencias son las coordenadas proporcionadas por Herbsman et al. (2009) [14] y Trapp et al. (2020) [15], quienes utilizaron los métodos de 5 y 5,5 cm. Estas dos

Tabla 2. Coordenadas proporcionadas por los artículos del estado del arte de la localización cerebral de la DLPFC.

Estudio		MNIx [mm]	MNIy [mm]	MNIz [mm]	Dist. Euclídea [mm]
Cardenas et al., 2022		-42,30	44,46	38,39	2,88
Trapp et al., 2020	BeamF3	-40,60	41,70	34,30	5,46
Fried et al. 2014		-41,50	41,10	33,40	6,32
Pommier et al. 2017	Ref-Mylius	-40,20	42,30	28,70	9,06
Fitzgerald et al., 2009		-41,30	48,90	27,70	9,18
Fox et al. 2012		-39,30	46,20	27,50	9,36
Pommier et al. 2017	Prop target	-45,90	36,40	25,30	15,80
Rusjan et al. 2010		-50,00	30,00	36,00	18,61
Trapp et al., 2020	5.5 cm rule	-33,60	30,80	51,10	22,86
Herbsman et al. 2009	Responders	-46,00	23,00	49,00	27,01
Promedio		-42,07	38,49	35,14	11,50
DS		4,46	8,24	8,91	8,02

Tabla 3. Coordenadas proporcionadas por los artículos del estado del arte de la localización en el cuero cabelludo de la DLPFC.

Estudio		MNIx [mm]	MNIy [mm]	MNIz [mm]	Dist. Euclídea [mm]
Cardenas et al. 2022		-51,0	51,0	44,0	2,88
Trapp et al. 2020	BeamF3	-49,30	48,70	41,00	4,67
Fried et al. 2014		-51,20	47,90	38,70	6,35
Pommier et al. 2017	Ref-Mylius	-48,90	48,84	34,31	9,06
Fox et al. 2012		-49,30	54,70	32,10	10,26
Fitzgerald et al., 2009		-48,90	55,40	31,70	10,82
Pommier et al. 2017	Ref-Mylius	-54,60	42,94	30,91	15,80
Rusjan et al. 2010		-58,40	35,10	40,20	19,87
Trapp et al. 2020	5.5 cm rule	-42,00	38,50	60,00	24,47
Herbsman et al. 2009	Responders	-54,10	27,20	54,60	28,99
Promedio		-50,77	45,03	40,75	13,32
DS		4,38	9,05	9,85	8,72

ubicaciones se encuentran más posteriores en el

Tabla 4. Resultados de la distancia media y su desviación estándar en los tres modelos de cabeza

Electrodo	Brainstorm [mm]	Estereotaxis [mm]	Elipsoide [mm]	Media [mm]	DS [mm]
LPA	10,11	7,59	25,33	14,34	9,60
RPA	9,59	9,22	25,22	14,68	9,13
Nz	0,01	0,00	11,99	4,00	6,92
Fp1	6,67	6,54	5,71	6,31	0,52
Fpz	4,01	2,17	1,05	2,41	1,49
Fp2	6,40	6,63	6,12	6,39	0,26
F7	15,40	14,62	13,19	14,40	1,13
F3	7,80	5,87	5,18	6,28	1,35
Fz	1,74	1,89	6,35	3,32	2,62
F4	8,21	8,09	6,56	7,62	0,92
F8	16,04	15,92	14,40	15,45	0,92
T7	5,60	4,38	15,85	8,61	6,30
C3	2,66	2,78	8,00	4,48	3,05
Cz	1,78	0,54	12,60	4,97	6,64
C4	1,96	3,41	9,40	4,92	3,94
T8	4,50	6,54	15,97	9,01	6,12
P7	14,95	16,12	14,25	15,11	0,94
P3	6,73	8,88	7,97	7,86	1,08
Pz	0,51	2,19	11,55	4,75	5,95
P4	7,65	8,76	10,37	8,93	1,37
P8	14,91	16,15	14,35	15,13	0,92
O1	6,86	8,36	6,09	7,10	1,15
Oz	2,52	5,05	3,45	3,67	1,28
O2	6,52	8,43	6,05	7,00	1,26
Iz	0,00	2,70	11,99	4,90	6,29
Media [mm]	6,53	6,91	10,76		
DS [mm]	4,77	4,67	5,83		

cerebro que el resto. Por otro lado, los trabajos que ubicaron la DLPFC izquierda con mayor precisión a la ubicación cerebral Oostenveld F3 son primeramente Cardenas et al. (2022), quien utiliza el Sistema Internacional 10-20, seguido por Fried et al. (2014) [16] y Trapp et al. (2020) que utilizan el sistema Beam F3.

Resultados muy parecidos se obtienen con las coordenadas del cuero cabelludo. De nuevo, las localizaciones obtenidas con los métodos de 5 y 5,5 cm sitúan la localización F3 demasiado posterior en el cuero cabelludo, mientras que los trabajos que sitúan la DLPFC más parecida a Oostenveld F3 son Cardenas et al. (2022), quien encontró la ubicación con el Sistema Internacional 10-20, seguido de Trapp et al. (2020) [15] y Fried et al. (2014) [16] que utilizan el Sistema BeamF3.

4.1 Cuantificación de errores en modelos de cabeza

Para cada modelo de cabeza se han posicionado sus electrodos con el Sistema Internacional 10-20 y para poder analizar la precisión de estos modelos en la localización de sus electrodos, se han calculado las distancias euclidianas que presentan estos a los proporcionados por Oostenveld [11], mostrándose los resultados en la Tabla 4. Además, se han calculado la media y la DE de cada modelo y de cada electrodo.

Se puede observar que el modelo que presenta menores diferencias es la segmentación de Brainstorm (diferencia media de 6,53 mm y SD de 4,77) seguido del modelo de cabeza Estereotáxico MNI152 (diferencia media de 6,91 mm y SD de 4,67 mm).

El modelo de elipsoide tiene una diferencia media de 10,76 mm y SD de 5,83mm) Ordenando los electrodos de mínima a máxima diferencia media (Figura 3a), se observa que los electrodos situados en el plano Ns-In tienen menor desviación y los electrodos del perímetro

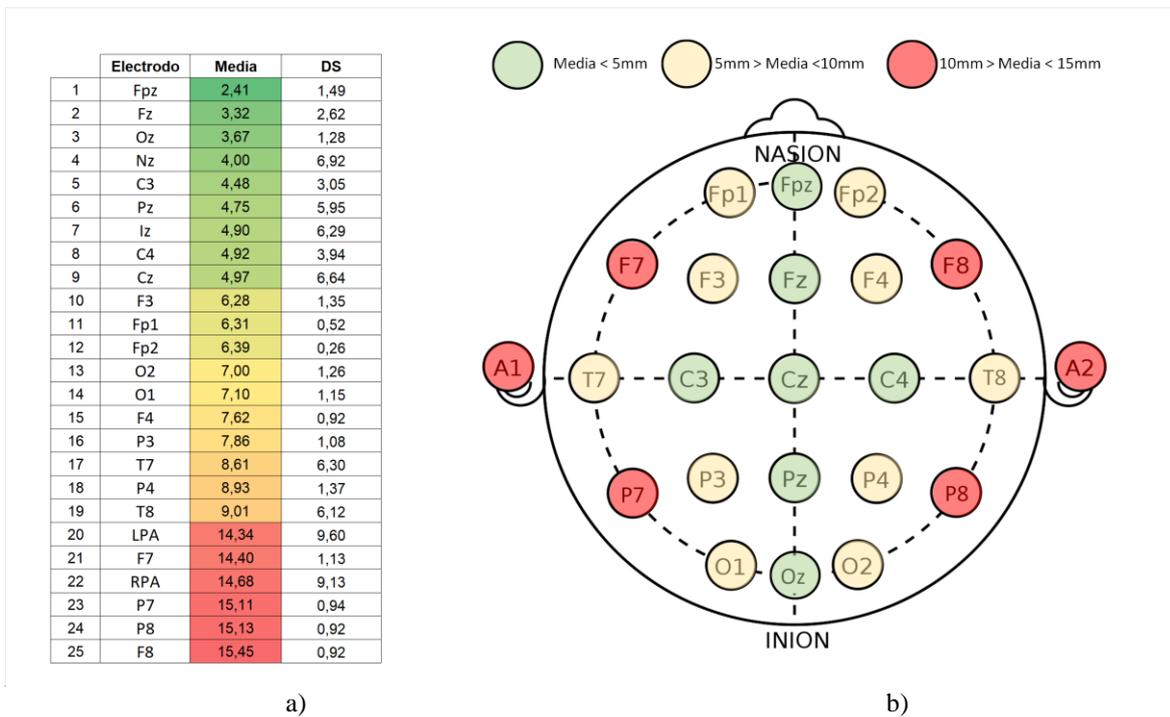


Figura 3. a) Resultados de la distancia media y su desviación estándar de los tres modelos ordenados. b) Gráfico del error medio según la posición del electrodo en la superficie craneal

craneal y especialmente los que no se encuentran en el plano Ns-In ni en el plano LPA-RPA (F7, F8, P7 y P8) tienen la mayor desviación. Las posiciones de LPA Y RPA también tienen un mayor error, pero no es destacable, ya que estas no son críticas para el desarrollo de los tests neurofisiológicos y el resultado está predominado por la gran diferencia en estas posiciones del elipsoide.

Referente a este último modelo, presenta diferencias considerablemente superiores a las posiciones LPA, RPA, T7, C3, CZ, C4, Pz e Iz pero ajusta adecuadamente las otras posiciones. Sin embargo, no parece que sea una buena opción cuando la ubicación de los electrodos tenga que ser precisa.

4. Conclusiones

Los datos obtenidos de la comparación de las coordenadas en la literatura científica permiten evaluar los métodos de localización existentes y cuantificar las diferencias existentes entre ellos. Existe una clara discrepancia entre las coordenadas de la DLPFC proporcionadas en la literatura. Se ha observado que el método de 5 cm, o sus variantes como el método de 5,5 cm apuntan a un sitio DLPFC más distante del considerado como correcto (errores de entre 24 i 29 mm), mientras que los métodos que determinan la localización mediante mediciones de la cabeza, como BeamF3 o el sistema International 10-20 posicionan la DLPFC con mayor precisión (errores inferiores a 10 mm).

Por otro lado, con los resultados obtenidos del análisis de la colocación de la totalidad de los electrodos del sistema 10-20 en diferentes modelos de cabeza, se ha comprobado que en dos cabezas MNI152 (una promediada directamente de 152 MRI y la otra normalizada a una plantilla MRI152) las ubicaciones no son las mismas. Finalmente, se ha cuantificado el error que se comete al modelar la cabeza con un elipsoide.

En estos tres modelos teóricos, se ha observado que las ubicación de los electrodo presentan errores (respecto los electrodos de referencia) que no son constantes. En concreto se ha visto que los electrodos situados en el plano Ns-In tienen menor error y los electrodos del perímetro craneal y especialmente los que no se encuentran en el plano Ns-In ni en el plano LPA-RPA presentan un error mayor.

Los errores en el elipsoide son casi siempre superiores a los modelos MNI152. Sin embargo, en ciertas posiciones como la F3 de estudio para la zona DLPFC se observan pequeñas diferencias (similares e incluso inferiores a los modelos MNI152) y por tanto se valora como un trabajo futuro el estudio en detalle de la posición de ciertos electrodos con un modelo de elipsoide.

5. Referencias

- [1] Johns Hopkins Medicine. (n.d.). *Brain Anatomy and How the Brain Works*. [Online]. <https://www.hopkinsmedicine.org/health/conditions-and-diseases/anatomy-of-the-brain>
- [2] Spronk, D., Arns, M., & Fitzgerald, P. (2011). Chapter 10: Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation in Depression: Protocols, Mechanisms, and New Developments. In R. Coben & J. R. Evans (Eds.), *Neurofeedback And Neuromodulation Techniques And Applications*, (pp. 257-291). Elsevier Inc. doi: 10.1016/b978-0-12-382235-2.00010-x
- [3] Mir-Moghtadaei, A., Siddiqi, S. H., Mir-Moghtadaei, K., Blumberger, D. M., Vila-Rodriguez, F., Daskalakis, Z. J., Fox, M. D., & Downar, J. (2022). *Updated scalp heuristics for localizing the dorsolateral prefrontal cortex based on convergent evidence of lesion and brain stimulation studies in depression*. *Brain Stimulation*, 15(2), 291–295. doi: 10.1016/j.brs.2022.01.013
- [4] Beam, W., Jeffrey, J. B., Scott, T. R., & George, M. S. (2009). *An efficient and accurate new method for locating the F3 position for prefrontal TMS applications*. *Brain Stimul.*, 2(1), 50–54. doi: 10.1016/j.brs.2008.09.006
- [5] Keeser, D., Meindl, T., Bor, J., Palm, U., Pogarell, O., Mulert, C., Brunelin, J., Möller, H. J., Reiser, M., & Padberg, F. (2011). *Prefrontal transcranial direct current stimulation changes connectivity of resting-state networks during fMRI*. *Journal of Neuroscience*, 31(43), 15284–15293. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0542-11.2011
- [6] Pommier, B., Vassal, F., Boutet, C., Jeannin, S., Peyron, R., & Faillenot, I. (2017). *Easy methods to make the neuronavigated targeting of DLPFC accurate and routinely accessible for rTMS*. *Neurophysiologie Clinique*, 47(1), 35–46. doi: 10.1016/j.neucli.2017.01.007
- [7] Brett, M. (2002). The MNI brain and the Talairach atlas. MNI Space - Brainmap.org. [Online]. <https://brainmap.org/training/BrettTransform.html>
- [8] Fox, M., Buckner, R., White, M., Greicius, M., & Pascual-Leone, A. (2012). *Efficacy of Transcranial Magnetic Stimulation Targets for Depression Is Related to Intrinsic Functional Connectivity with the Subgenual Cingulate*. *Biological Psychiatry*, 72(7), 595-603. doi: 10.1016/j.biopsych.2012.04.028
- [9] Mir-Moghtadaei, A., Caballero, R., Fried, P., Fox, M. D., Lee, K., Giacobbe, P., Daskalakis, Z. J., Blumberger, D. M., & Downar, J. (2015). *Concordance between BeamF3 and MRI-neuronavigated target sites for repetitive transcranial magnetic stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex*. *Brain Stimulation*, 8(5), 965–973. doi: 10.1016/j.brs.2015.05.008
- [10] Siddiqi, S., Schaper, F., Horn, A., Hsu, J., Padmanabhan, J., & Brodtmann, A. et al. (2021). *Brain stimulation and brain lesions converge on common causal circuits in neuropsychiatric disease*. *Nature Human Behaviour*, 5(12), 1707-1716. doi: 10.1038/s41562-021-01161-1
- [11] Oostenveld, O. (2006). *High-density EEG electrode placement*. Robert Oostenveld's blog. [Online]. <https://robertoostenveld.nl/electrode/>
- [12] Tadel, F. et al. (2011). *Brainstorm* [Computer Software]. <https://neuroimage.usc.edu/brainstorm/>
- [13] NeuroImaging and Surgical Technologies Lab. (2022). *Atlases*. [Online]. <http://nist.mni.mcgill.ca/atlasses/>
- [14] Herbsman, T., Avery, D., Ramsey, D., Holtzheimer, P., Wadjik, C., Hardaway, F., Haynor, D., George, M. S., & Nahas, Z. (2009). *More Lateral and Anterior Prefrontal Coil Location Is Associated with Better Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Antidepressant Response*. *Biological Psychiatry*, 66(5), 509–515. doi: 10.1016/j.biopsych.2009.04.034
- [15] Trapp, N., Bruss, J., King Johnson, M., Uitermarkt, B., Garrett, L., & Heinzerling, A. et al. (2020). *Reliability of targeting methods in TMS for depression: Beam F3 vs. 5.5 cm*. *Brain Stimulation*, 13(3), 578-581. doi: 10.1016/j.brs.2020.01.010
- [16] Fried, P. J., Rushmore, R. J., Moss, M. B., Valero-Cabré, A., & Pascual-Leone, A. (2014). *Causal evidence supporting functional dissociation of verbal and spatial working memory in the human dorsolateral prefrontal cortex*. *European Journal of Neuroscience*, 39(11), 1973–1981. doi: 10.1111/ejn.12584