

Modelo para la prescripción de los contactos más efectivos de los electrodos cerebrales implantados en el núcleo subtalámico en pacientes con enfermedad de Parkinson

Prescribing model for the most effective contacts of implanted brain electrodes in the subthalamic nucleus in patients with Parkinson's disease

Fabián Piedimonte^{1,2}  , Nicolás Barbosa¹, Ezequiel Guzmán², Pablo Roitman², Virginia Rosales², Claudia Vercelli², Eduardo Voitovich², Juan Pablo Travi¹, Nelson Quintanal Cordero¹.

¹Fundación CENIT para la Investigación en Neurociencias. Buenos Aires. Argentina.

²MBAc Salud, Universidad de San Andrés.

Cómo citar: Piedimonte F, Barbosa N, Guzmán E, Roitman P, Rosales V, Vercelli C, et al. Modelo para la prescripción de los contactos más efectivos de los electrodos cerebrales implantados en el núcleo subtalámico en pacientes con enfermedad de Parkinson. *NeuroTarget*. 2025;19(1):29-35.

<https://doi.org/10.47924/neurotarget2025479>

Autor para correspondencia: Fabián Piedimonte. Fundación CENIT para la Investigación en Neurociencias. Buenos Aires. Argentina. Dirección de correo electrónico: fpiedimonte@fundacioncenit.org.ar

Recibido: 22-06-2024

Revisado: 27-09-2024

Aceptado: 21-12-2024

Publicado: 09-01-2025

Editor: Dr. Sergio Sacchettoni 

Resumen

Introducción. El proyecto se enfoca en optimizar el proceso de programación inicial de los electrodos implantados en el núcleo subtalámico para la estimulación cerebral profunda en pacientes con enfermedad de Parkinson. Tradicionalmente, esta programación requiere de pruebas extensas ("prueba de contactos") para determinar qué contacto o contactos del electrodo genera la mejor respuesta sin efectos adversos.

Objetivo del Proyecto. Desarrollar un sistema predictivo basado en los datos del microregistro multiunitario intraoperatorio y de las imágenes posoperatorias para seleccionar el contacto más efectivo del electrodo, reduciendo así el tiempo de programación y mejorando la calidad de vida del paciente.

Método: Componentes del Sistema: Uso de imágenes pre y postoperatorias fusionadas de Tomografía Computarizada y de Resonancia Magnética para planeamiento estereotáctico. Microregistros multiunitarios intraoperatorios para la localización precisa del núcleo subtalámico. Análisis de datos con herramientas de visualización (mapas de calor, reconstrucción 3D) y algoritmos de machine learning (supervisado y no supervisado). **Beneficios Esperados:** Disminución del tiempo de la consulta para la programación; selección más precisa y rápida de los contactos efectivos; mejora rápida en el control de síntomas como rigidez, temblor y bradiquinesia y optimización de recursos institucionales. **Evaluación del Modelo:** Se utilizará una matriz de confusión para validar la precisión del sistema frente al método tradicional y se realizará un seguimiento comparativo entre la predicción del modelo y la evaluación del neurólogo. **Implementación:** El modelo fue implementado en un primer paciente en abril de 2024.

Conclusión. Consideramos que el siguiente proyecto puede dar a luz a una herramienta práctica y de extrema utilidad en el campo de la neuromodulación cerebral para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson. Con el presente modelo intentamos alcanzar en forma expeditiva y precisa la selección de los contactos más efectivos de los electrodos implantados y de esta manera, obtener resultados terapéuticos óptimos de forma precoz.

Palabras claves: Estimulación Cerebral Profunda, enfermedad de Parkinson, núcleo subtalámico.

Abstract

Introduction. This project focuses on optimizing the initial programming process of electrodes implanted in the subthalamic nucleus for deep brain stimulation in patients with Parkinson's disease. Traditionally, this programming requires extensive testing ("contact testing") to determine which electrode contact(s) generate the best response without adverse effects.

Project Objective: To develop a predictive system based on intraoperative multi-unit micro-recording data and postoperative images to select the most effective electrode contact, thereby reducing programming time and improving patient quality of life.

Method: System Components: Use of fused pre- and postoperative CT and MRI images for stereotactic planning. Intraoperative multi-unit micro-recordings for precise localization of the subthalamic nucleus. Data analysis with visualization tools (heat maps, 3D reconstruction) and machine learning algorithms (supervised and unsupervised). **Expected Benefits:** Reduction in consultation time for programming; more accurate and faster selection of effective contacts; rapid improvement in the control of symptoms such as rigidity, tremor, and bradykinesia; and optimization of institutional resources. **Model Evaluation:** A confusion matrix will be used to validate the system's accuracy against the traditional method, and a comparative follow-up will be conducted between the model's prediction and the neurologist's assessment. **Implementation:** The model was implemented in the first patient in April 2024.

Conclusion: We believe that the following project could lead to a practical and extremely useful tool in the field of brain neuromodulation for the treatment of Parkinson's disease. With this model, we aim to expeditiously and accurately select the most effective contacts for the implanted electrodes and thus obtain optimal therapeutic results early.

Keywords: Deep Brain Stimulation, Parkinson's disease, subthalamic nucleus.

Introducción

Los pacientes con enfermedad de Parkinson que no responden correctamente al tratamiento farmacológico pueden ser candidatos a cirugía para controlar los síntomas de rigidez, lentitud del movimiento (bradiquinesia) y/o temblor. El procedimiento más difundido consiste en el implante de electrodos cerebrales profundos en diferentes núcleos del cerebro (DBS, por sus siglas en inglés).^{1,2}

En el caso del núcleo subtalámico (NST), la técnica del implante consiste en la planificación inicial del blanco quirúrgico en la región dorsolateral del mismo, utilizando los estudios por imágenes realizados a los pacientes previo a la cirugía: Resonancia Magnética Nuclear (RMN) y Tomografía Computada (TC) de cráneo que luego se fusionan.

Posteriormente se superponen atlas anatómicos específicos a las imágenes de RMN y TC fusionadas y se identifican las coordenadas de nuestro blanco en los tres planos del espacio: X (lateralidad), Y (antero posterioridad) y Z (profundidad).

En base a estas coordenadas y con un sistema de precisión milimétrica denominado marco estereotáctico (Figura 1) se descienden gradualmente los microelectrodos para efectuar registros electrofisiológicos que se visualizan y registran en un programa informático de procesamiento digital de señales, con el objetivo de identificar el centro del núcleo y sus límites.²⁻⁴

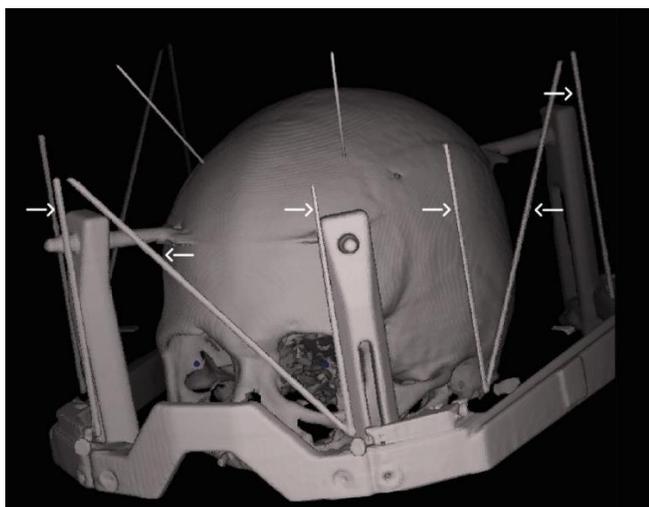


Figura 1. Reconstrucción 3D del marco estereotáctico fijado a la calota del paciente con los fiduciales (flechas) que permiten definir la ubicación espacial de las estructuras cerebrales.

A partir de la información obtenida mediante la exploración temporaria con los microregistros se decide el blanco final, en el cual se implanta un electrodo definitivo de estimulación de 8 contactos, distribuidos en 4 niveles separados por 0,5 mm entre cada uno de los niveles (Figura 2), logrando de esta manera una extensión de estimulación que cubra la totalidad del núcleo subtalámico en su extensión rostro caudal.

La confirmación de la correcta ubicación de los electrodos implantados de acuerdo a las coordenadas preestablecidas se

efectúa mediante radioscopia intraoperatoria en incidencia lateral (Figura 3).



Fig. 2. Estimulación cerebral profunda del núcleo subtalámico. (A): RMN postoperatoria luego del implante de electrodos cerebrales profundos donde se identifican los cuatro niveles de contactos en cada hemisferio cerebral. (B): Esquema del electrodo de estimulación cerebral profunda con cuatro niveles de contacto de 1.5 mm de longitud, distanciados por 0.5 mm entre ellos.

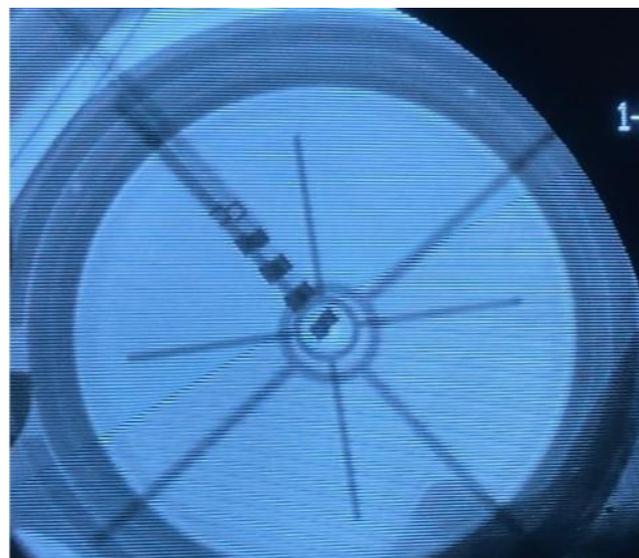


Figura 3. Imagen de radioscopia (Rayos X) intraoperatoria en la cual se observan los dos electrodos implantados, confirmando su correcta ubicación en base a las coordenadas seleccionadas.

Finalizado el implante de los electrodos, se realiza la colocación de un generador de pulsos programable teleméricamente, que es conectado mediante extensores a los electrodos cerebrales ya implantados. Este generador es el responsable de emitir el estímulo eléctrico que alcanza al NST.⁵⁻⁸

Luego de un período variable de entre 7 y 21 días, necesario para aguardar el descenso del edema posoperatorio alrededor del electrodo, comienzan las sesiones de programación del dispositivo para obtener el paradigma de estimulación óptimo para el control de los síntomas. Este procedimiento de búsqueda de los contactos más efectivos y que no generen efectos adversos se denomina “prueba de contactos”.

Descripción de la iniciativa

Usuarios: Neurólogo especializado en movimientos anorma-

les, especialistas clínicos y técnicos en neuromodulación, encargados en la visita inicial de realizar la prueba de contactos de los electrodos cerebrales profundos implantados y su programación.

Stakeholders de la solución y pains– necesidades – beneficios:

- Paciente: demora para alcanzar el estado óptimo posoperatorio del control de los síntomas que impactan significativamente en la calidad de vida del paciente.

- Neurólogo: excesivo tiempo requerido para realizar una pormenorizada evaluación de cada contacto del electrodo implantado para definir cuál o cuáles son los más efectivos en la estimulación (programación inicial o prueba de contactos).

- Institución: alto uso de consultorios y recurso humano.

• **Solución a proponer:** Desarrollar un sistema basado en los datos obtenidos de la cirugía (microregistro intraoperatorio) y la ubicación final en el espacio del electrodo implantado para predecir qué contacto sería el más efectivo para estimular e iniciar la estimulación directamente con el mismo, evitando sesiones prolongadas de programación.

• **Beneficios esperados:** Significativa reducción del tiempo en la programación inicial del sistema de estimulación cerebral profunda y optimización de la terapia en forma precoz, obteniendo el control de los síntomas rápidamente.

Descripción a alto nivel de la arquitectura de datos

Historia clínica digital: para la obtención de los datos del paciente y de los resultados objetivos de las escalas preoperatorias, valorando los síntomas del paciente y la gravedad de la enfermedad.

Sistema de planeamiento estereotáctico: permite visualizar el blanco (Núcleo Subtalámico) y la trayectoria, definiendo las coordenadas iniciales en los tres planos del espacio de la estructura a abordar (Figura 4).

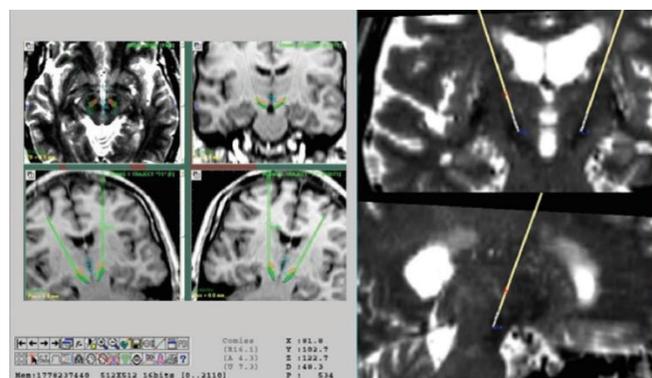


Figura 4. Planeamiento preoperatorio del blanco quirúrgico (NST) y representación virtual de las estructuras y de la trayectoria del electrodo mediante el software de planeamiento MSPS® sobre la base de la Resonancia Magnética Nuclear realizada previamente.

Sistema de microregistro multiunitario intraoperatorio (NDRS):⁹ confirma la región más activa del NST donde debería efectuarse la estimulación cerebral profunda para obtener los mejores beneficios en cuanto al control de los

síntomas (Figura 5). Dicha ubicación queda representada por las distancias en milímetros en sentido lateral (X), antero-posterior (Y) y superior-inferior (Z), a partir de un punto predeterminado en las imágenes de planeamiento preoperatorio denominado Punto Medio Comisural (ICP, por sus siglas en inglés)

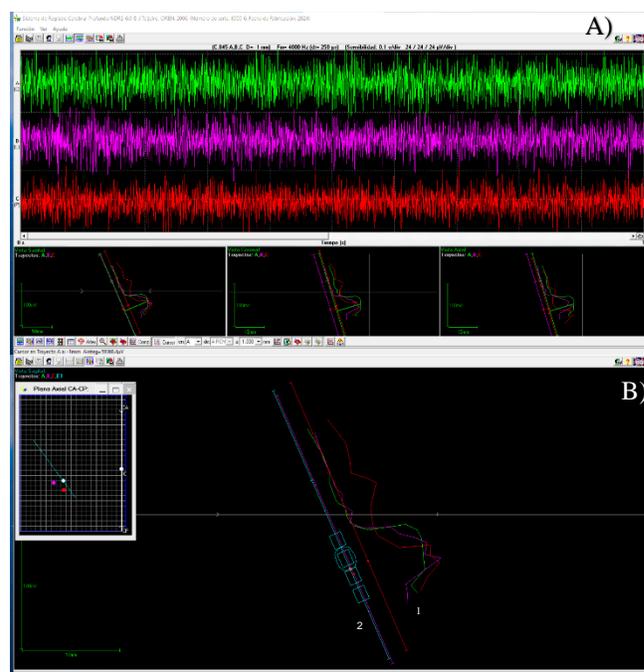


Figura 5. Registro neurofisiológico intraoperatorio de la actividad cerebral profunda. A) Señal obtenida durante el descenso simultáneo de tres electrodos de microregistro multiunitario. B) Representación de la actividad registrada mediante la integral, en la cual se observan: (1) los picos de onda resultantes del incremento de actividad nuclear. (2) Representación teórica ideal de la ubicación del electrodo con los cuatro niveles de contacto en relación a la actividad del núcleo.

Tomografía computada postoperatoria: se realiza luego del implante de los electrodos octopolares en forma bilateral para identificar la ubicación de cada nivel de los cuatro contactos de los electrodos.

Estas imágenes se fusionan y procesan con las imágenes de planificación en condiciones estereotácticas con el programa MSPS® para poder determinar con precisión la ubicación en los tres planos del espacio de cada uno de los contactos y trasladarlos a una tabla junto a los datos de la ubicación espacial del núcleo subtalámico (Figura 6 y Tabla 1).

Indicadores de los resultados

- Tiempo de consulta (horas) de la evaluación neurológica para realizar la prueba de contactos inicial en el paciente operado con implante de DBS.
- Elección de los contactos más adecuados del electrodo y programación de un mejor paradigma de estimulación.
- Eficacia en los resultados del control de síntomas evaluados por la Escala Unificada de la Enfermedad de Parkinson

(UPDRS, por sus siglas en inglés), para identificar en forma objetiva los cambios en los síntomas motores.

- Tiempo en alcanzar el estado óptimo de la estimulación cerebral.

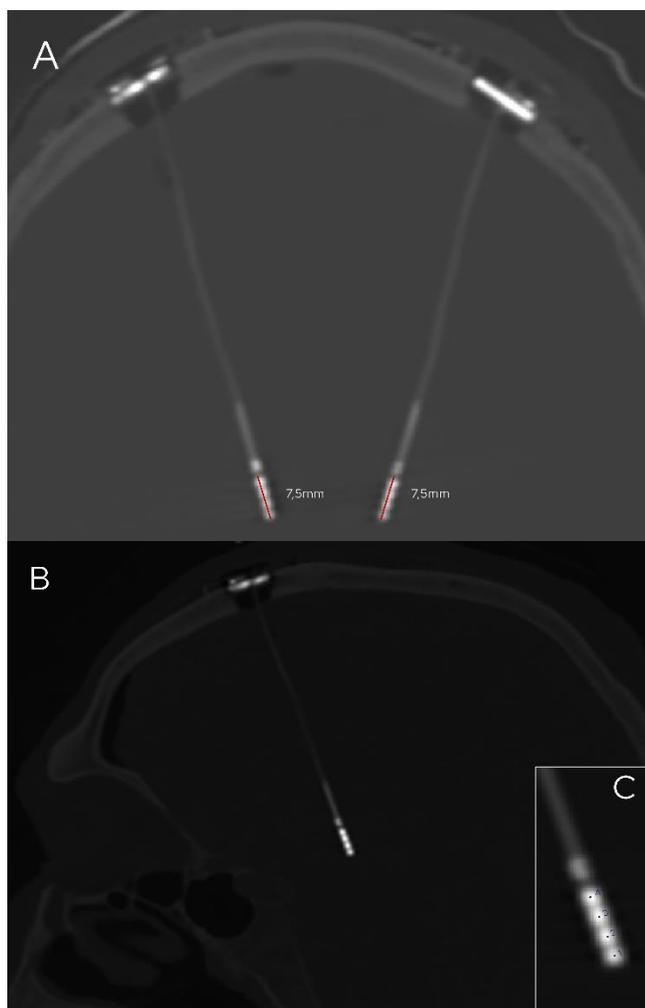


Figura 6. TC postoperatoria con la identificación de los electrodos implantados y la extensión del área de estimulación de 7,5 mm resultante de la sumatoria de los cuatro niveles de contactos (1,5 mm por nivel) y la distancia entre ellos (0,5 mm). A) Visión coronal, B) Visión sagital, C) Aproximación de la imagen del extremo del electrodo donde se identifica con claridad el centro de cada uno de los contactos que se consideran como referencia para su ubicación espacial en los tres planos del espacio.

Descripción de las técnicas analíticas a utilizar

1- **Dataviz:** Presentación de los datos correspondientes a la ubicación óptima del núcleo a estimular (NDRS[®])⁹ y la ubicación final de cada uno de los contactos de los electrodos implantados (imágenes fusionadas con sistema MSPS[®]).

Mapas de calor: Esta herramienta nos permitirá obtener una lectura rápida de aquellos contactos con mayor cercanía al área del núcleo subtalámico que buscamos estimular, para obtener los mejores resultados (Tabla 2).

2- **Análisis Prescriptivo:** Primera etapa: Machine Learning supervisado: Clasificación.

Se ingresarán sistemáticamente los datos obtenidos de la ubicación en el espacio de cada uno de los contactos de los electrodos, así como el dato de la ubicación en el espacio de la porción seleccionada del núcleo subtalámico a estimular.

	X	Y	Z
NST izquierdo x MER	10.5	-4.2	4.5
Nivel 1	9.5	-5.6	7.2
Nivel 2	10.1	-4.8	5.6
Nivel 3	10.7	-3.9	3.9
Nivel 4	11.4	-3.0	2.2
NST derecho x MER	-11.7	-3.9	3.6
Nivel 1	-10.3	-5.8	6.9
Nivel 2	-11.0	-4.8	5.2
Nivel 3	-11.7	-3.9	3.6
Nivel 4	-12.4	-2.9	2.0

Tabla 1. Datos sobre la ubicación en los tres planos del espacio de la porción más activa del Núcleo Subtalámico (STN) de acuerdo al Microregistro Intraoperatorio (MER) y de cada uno de los niveles de contactos de los electrodos implantados.

	X	Y	Z
NST izquierdo x MER	10.5	-4.2	4.5
Nivel 1	9.5	-5.6	7.2
Nivel 2	10.1	-4.8	5.6
Nivel 3	10.7	-3.9	3.9
Nivel 4	11.4	-3.0	2.2
NST derecho x MER	-11.7	-3.9	3.6
Nivel 1	-10.3	-5.8	6.9
Nivel 2	-11.0	-4.8	5.2
Nivel 3	-11.7	-3.9	3.6
Nivel 4	-12.4	-2.9	2.0

Tabla 2. Tabla de calor de la ubicación en los tres planos del espacio (X, Y, Z) del área del núcleo subtalámico izquierdo y derecho a estimular en comparación con la ubicación de cada uno de los niveles de contactos de los electrodos izquierdo y derecho.

Se le indicará al algoritmo qué contactos se deben utilizar para estimular el área del núcleo subtalámico seleccionada de acuerdo a su posición y cercanía.

En paralelo, se validará este sistema realizando el proceso habitual de evaluación de la totalidad de los contactos (prueba y error) llevada a cabo por el neurólogo, para confirmar si efectivamente la elección del contacto por este método fue la más efectiva (ver sección “seguimiento de los resultados”).

En una segunda etapa se utilizará Machine Learning no supervisado para identificar patrones subyacentes en los datos analizados, agrupar instancias similares o detectar anomalías.

3- **Matriz de confusión - Evaluación del modelo**

Mediante la utilización de la “Matriz de confusión” se

procederá a evaluar el modelo con el objetivo de su validación, contrastando los resultados obtenidos a partir de la iniciativa propuesta con los resultados surgidos de la evaluación clásica y utilizada habitualmente, identificando el comportamiento de las predicciones (negativas y positivas) en relación a la realidad del dato (negativo y positivo) (Tabla 3), y de esta manera determinar la exactitud, precisión, sensibilidad y especificidad del modelo.

real negativa (RN)	VN	FP
real positiva (RP)	FN	VP
	predicción negativa	predicción positiva

Tabla 3. Tabla de matriz de confusión para definir sensibilidad y especificidad del modelo.

4- Representación gráfica 3D

Se efectuará la reconstrucción tridimensional del NST y la ubicación final y precisa de cada uno de los contactos del electrodo. (Figura 7)

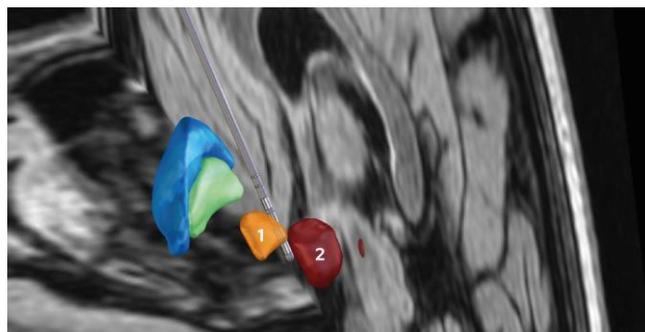


Figura 7. Reconstrucción tridimensional de la ubicación final de los electrodos de estimulación cerebral profunda y sus cuatro niveles de contactos en relación a la localización de los núcleos subtalámico (1) y rojo (2) en base a los datos recogidos del microregistro intraoperatorio y la tomografía posoperatoria.

Seguimiento de los resultados

En la prueba inicial de contactos se comenzará la evaluación por el contacto considerado más efectivo para la estimulación, igualmente se llevará adelante por el médico neurólogo el proceso habitual de evaluación de la totalidad de los contactos (prueba y error), para confirmar si efectivamente la elección del contacto por este método fue la más efectiva.

El procedimiento consiste en citar al paciente luego de la segunda semana del implante de electrodos cerebrales profundos para realizar el encendido del sistema de estimulación y en forma individual, observar los resultados con la estimulación de los diferentes contactos, con el objetivo de:

1) Evidenciar el beneficio de la estimulación a través de la

respuesta en el control de los síntomas previos de la enfermedad: temblor, rigidez, bradiquinesia (lentitud en los movimientos) y disquinesias (movimientos involuntarios).

2) Definir la aparición de efectos adversos secundarios a la estimulación no deseada de áreas diferentes al NST.

Esta actividad se lleva a cabo en forma manual y puede requerir varios días hasta la comprensión definitiva de los electrodos más útiles para el control de los síntomas del paciente. Los datos se extrapolan a una planilla preparada para tal fin. (Figura 8).

Aspectos a considerar

1. Skills a considerar en el proyecto: El proyecto se basa en las habilidades específicas del equipo de trabajo multidisciplinario. Cada participante es encargado de un proceso específico y determinado por su expertise.

2. Origen del desarrollo: La idea y desarrollo del proyecto es propio del Grupo 2 del MBA en Salud, cohorte 2023 de la UdeSA.

3. Elementos de inversión principales: Mínima inversión teniendo en cuenta que, para la adquisición de la mayor parte de los datos necesarios, estos ya están registrados en la práctica asistencial cotidiana con la tecnología existente. Se considerará un coordinador del proyecto como recurso humano adicional.

4. Riesgos y Factores críticos de éxito del proyecto:

Consideramos que los riesgos del proyecto son mínimos y eventualmente solucionables.

Un inconveniente que podría presentarse es la reducción del flujo habitual de cirugías por temas relacionados a la situación de la cobertura de estas terapias por parte del Estado y los financiadores en relación a la situación imperante en el ámbito de la salud en nuestro país. Este problema podríamos solucionarlo parcialmente convocando a otros centros para sumarse en el reclutamiento de datos e incrementando el tamaño de la muestra.

5. Actividades clave del proyecto: Fue fundamental la modificación del protocolo de realización de la TC postoperatoria de control para poder obtener la ubicación real de los niveles de los contactos luego de implantados los electrodos, dato fundamental para conocer su cercanía anatómica al área del NST a estimular. También consideramos que la representación gráfica en 3D indica la reconstrucción tridimensional del núcleo subtalámico y la ubicación final y precisa de cada uno de los contactos del electrodo en base a los datos recogidos del microregistro intraoperatorio y a la tomografía posoperatoria, alimentando nuestro análisis también para explicar y mostrar a personas ajenas, su ubicación específica por una imagen que proviene de alta tecnología gráfica en precisión.

6. Alianzas: Se considera invitar a participar del proyecto a Instituciones que lleven adelante este tipo de práctica para incrementar el número de datos adquiridos y lograr mayor velocidad en la validación del modelo. Por el flujo de cirugías de este tipo se seleccionan las siguientes Instituciones: Fundación Favaloro, Hospital Italiano y FLENI.

7. Cierre y próximos pasos para llevarlo adelante: El día lunes 22/4/2024 hemos puesto en marcha el modelo en el primer paciente. Varias de las figuras y datos incluidos en este trabajo provienen de ese procedimiento con el sistema de adquisición de imágenes postoperatorias necesario para la medición espacial de los niveles de contacto de los electrodos.

Conclusiones finales

Consideramos que el siguiente proyecto puede dar a luz una herramienta práctica y de extrema utilidad en el campo de la neuromodulación cerebral para el tratamiento de la enfermedad de Parkinson.

Con el presente modelo intentamos alcanzar en forma expeditiva y precisa la selección de los contactos de los electrodos implantados y de esta manera, obtener resultados terapéuticos óptimos de forma precoz.

Prueba de contactos DBS



Nombre: _____ Fecha: _____
 INS: Activa® SC PC RC Otro: _____

CONFIGURACIÓN IZQUIERDA

Amp: _____ AP: _____ FR: _____
 Electrodo: _____
 Uso: _____ % = _____ hrs

CHEQUEO DE IMPEDANCIAS

1 -, C+ _____ Ω
 2 -, C+ _____ Ω
 3 -, C+ _____ Ω
 4 -, C+ _____ Ω

CONFIGURACIÓN DERECHA

Amp: _____ AP: _____ FR: _____
 Electrodo: _____
 Uso: _____ % = _____ hrs

CHEQUEO DE IMPEDANCIAS

1 -, C+ _____ Ω
 2 -, C+ _____ Ω
 3 -, C+ _____ Ω
 4 -, C+ _____ Ω

EFFECTOS DE ESTIMULACIÓN

IZQUIERDO: AP: _____ FR: _____			DERECHO: AP: _____ FR: _____		
Electrodo	Amp (V)	Comentarios	Electrodo	Amp (V)	Comentarios

IZQUIERDO: AP: _____ FR: _____			DERECHO: AP: _____ FR: _____		
Electrodo	Amp (V)	Comentarios	Electrodo	Amp (V)	Comentarios

IZQUIERDO: AP: _____ FR: _____			DERECHO: AP: _____ FR: _____		
Electrodo	Amp (V)	Comentarios	Electrodo	Amp (V)	Comentarios

Prueba de contactos DBS

EFFECTOS DE ESTIMULACIÓN (Cont.)

IZQUIERDO: AP: _____ FR: _____			DERECHO: AP: _____ FR: _____		
Electrodo	Amp (V)	Comentarios	Electrodo	Amp (V)	Comentarios

IZQUIERDO: AP: _____ FR: _____			DERECHO: AP: _____ FR: _____		
Electrodo	Amp (V)	Comentarios	Electrodo	Amp (V)	Comentarios

IZQUIERDO					DERECHO				
AMP	AP	FR	Contactos	Comentarios	AMP	AP	FR	Contactos	Comentarios

CONFIGURACIÓN FINAL

IZQUIERDO: AMP: _____ AP: _____ FR: _____	DERECHO: AMP: _____ AP: _____ FR: _____
Electrodos: _____ Ω	Electrodos: _____ Ω
Impedancia de la terapia: _____ Ω	Impedancia de la terapia: _____ Ω
Batería: _____ V	Batería: _____ V

Figura 8. Planilla para la recolección de los datos, determinando los efectos positivos mediante la estimulación con cada contacto del electrodo y los potenciales efectos adversos.

Bibliografía

1. Piedimonte F, Acosta T. Núcleo subtalámico. *Neurotarget*. 2015;9(4):8-9.
2. Quintanal Cordero NE, Rodriguez Rojas R, Carballo Barreda M, García Maeso I, Teijeiro Amador J, Macias González R, et al. Abordaje seguro al núcleo subtalámico. Impacto del ángulo parasagital mayor de 20 grados. *NeuroTarget*. 2019;13(4).
3. Malinova V, Pinter A, Dragaescu C, Rohde V, Trenkwalder C, Sixel-Döring F, et al. The role of intraoperative microelectrode recording and stimulation in subthalamic lead placement for Parkinson’s disease. *PloS One*. 2020;15(11):e0241752.
4. Lopez-Flores G, Miguel-Morales J, Teijeiro-Amador J, Vitek J, Perez-Parra S, Fernandez-Melo R, et al.

- Anatomic and neurophysiological methods for the targeting and lesioning of the subthalamic nucleus: Cuban experience and review. *Neurosurgery*. 2003;52(4):817-30
5. Bejjani BP, Dormont D, Pidoux B, Yelnik J, Damier P, Arnulf I, et al. Bilateral subthalamic stimulation for Parkinson’s disease by using three-dimensional stereotactic magnetic resonance imaging and electrophysiological guidance. *J Neurosurg*. 2000;92(4):615-25.
6. Singh M, Shabari Girishan KV, Bajaj J, Garg K. Deep brain stimulation for movement disorders: Surgical nuances. *Neurol India*. 2018;66(Supplement):S122-s130.
7. Machado A, Rezai AR, Kopell BH, Gross RE, Sharan AD, Benabid AL. Deep brain stimulation for Parkinson’s disease: surgical technique and perioperative management. *Mov Disord*. junio de 2006;21 Suppl 14:S247-58.

8. Shin M, Lefaucheur JP, Penholate MF, Brugieres P, Gurruchaga JM, Nguyen JP. Subthalamic nucleus stimulation in Parkinson's disease: postoperative CT-MRI fusion images confirm accuracy of electrode placement using intraoperative multi-unit recording. *Neurophysiol Clin.* diciembre de 2007;37(6):457-66.
9. Teijeiro J, Macías RJ, Maragoto C, García I, Alvarez M, Quintanal NE. Registro cerebral profundo y tiempo quirúrgico en la neurocirugía estereotáctica funcional para trastornos del movimiento. *Neurocirugía.* 2014;25(3): 116-27.