

Vigilancia neurofisiológica transoperatoria multimodal en cirugía de columna

Miguel Ángel Collado-Corona, * Roberto de Leo-Vargas, ** Víctor Sandoval-Sánchez, *** Alejandro Díaz-Hernández, & Bernardo José Gutiérrez-Sougarret, & Paul Shkurovich-Bialik*

Resumen

Introducción: La vigilancia neurofisiológica durante la cirugía de columna vertebral y de la médula espinal consiste en pruebas de potenciales evocados somatosensoriales, potenciales motores musculares, potenciales dermatomales y electromiografía. El riesgo de daño neurológico permanente después de una cirugía medular sin monitorización es significativo y el costo alto. El objetivo de la vigilancia neurofisiológica es identificar, prevenir y corregir de forma inmediata el daño neurológico que puede pasar inadvertido durante la cirugía de columna vertebral y médula espinal.

Material y métodos: Estudio transversal, observacional y descriptivo de los pacientes sometidos a cirugía de columna entre 2007 y 2008 con vigilancia neurofisiológica transoperatoria.

Resultados: La muestra estuvo integrada por 351 pacientes, 135 del sexo masculino (38.46 %) y 216 del femenino (61.54 %); 82 % correspondió a patología osteodiscal con o sin afectación medular, 12 % a etiología traumática, 4 % a corrección de escoliosis y 2 % a tumores medulares; por localización, 62.1 % a patología lumbar, 33 % a cervical, 4.3 % a nivel dorsal y 0.5 % a nivel sacro. El 12.4 % de los pacientes presentó mejoría de la respuesta basal de sus potenciales evocados somatosensoriales; 56.8 % los mantuvo similares a sus controles prequirúrgicos, 28.4 % requirió llamada de alerta al cirujano por riesgo de daño y 2.4 % caída severa de respuesta. En ningún caso hubo pérdida permanente.

Conclusiones: La vigilancia neurofisiológica constituye una herramienta de gran valor que evita daños que pueden producirse durante esta cirugía.

Palabras clave: Vigilancia neurofisiológica transoperatoria, columna vertebral, electromiografía, potenciales evocados somatosensoriales, potenciales motores.

Summary

Background: Intraoperative neurophysiological monitoring (IOM) during spine surgery consists of several functional tests including somatosensory evoked potentials (SSEPs), motor evoked potentials (MEPs), dermatomal potentials (DPs) and EMG (electromyography). Permanent neurological damage after spine surgery performed without intraoperative neurophysiological monitoring is frequent and often very costly. The main goal of IOM is the immediate detection, prevention and correction of neurological damage during surgery, which may go unnoticed without using these tests.

Methods: A total of 351 clinical files of patients with spinal surgery and continuous neurophysiological monitoring were transversally and descriptively reviewed from 2007 to 2008.

Results: There were 135 male patients (38.46%) and 216 female patients (61.54%); 82% of the cases were osteodiscal pathology with or without medullar involvement, 12% were patients with traumatic injuries, 4% with scoliosis and 2% had medullary tumors. Regarding localization, 62.1% were lumbar, 33% cervical, 4.3% thoracic and 0.5% sacral involvement; 12.4% of our cases showed significant improvement of the basal responses on SSEPs, and 56.8% showed no significant change during the procedure. In 28.4% of the cases, the surgical team had to be advised of potential neurological damage and in 2.4% there was absence of neurophysiological responses. No patient showed complete loss of any neurophysiological response. All patients reported clinical improvement after hospital discharge.

Conclusions: Intraoperative neurophysiological monitoring may help avoid certain neurological risks during spine surgery, which may go unnoticed without the use of this technique.

Key words: Intraoperative neurophysiological monitoring, spine, electromyography, somatosensory evoked potentials, motor potentials.

Introducción

La vigilancia neurofisiológica durante la cirugía de columna vertebral es una herramienta indispensable en la cirugía actual. La primera prueba utilizada para evaluar la función de la médula espinal durante la cirugía de columna fue la llamada “prueba del despertar” o *wake-up test*, y fue propuesta por Vauzelle y Stagnara,¹ e indicada principalmente en pacientes sometidos a corrección de escoliosis; consiste en disminuir la anestesia con el paciente en la mesa de operaciones y solicitarle que movilice las

* Servicio de Neurofisiología Clínica, Centro Neurológico.

** Servicio de Neurocirugía, Centro Neurológico.

*** Servicio de Ortopedia y Cirugía de Columna, Centro Neurológico.

& Servicio de Anestesiología.

The American British Cowdray Medical Center IAP, México, D. F.

Solicitud de sobretiros:

Miguel Ángel Collado-Corona. Servicio de Neurofisiología Clínica, The American British Cowdray Medical Center IAP. Centro Neurológico Santa Fe, Av. Carlos Graef Fernández 154-204, Col. Tlaxala, Del. Cuajimalpa, 05300 México, D. F. Tel.: (55) 1664 7091. Fax: (55) 1664 7100. E-mail: mcollado@prodigy.net.mx

Recibido para publicación: 25-03-2009

Aceptado para publicación: 24-06-2009

extremidades. Esta prueba dejó de utilizarse debido a las limitaciones y riesgos que tenía.

En la década de 1980, Nuwer y Dawson² introdujeron la monitorización con potenciales evocados somatosensoriales como prueba neurofisiológica para evaluar la función medular durante la colocación de barras de Harrington. Más recientemente, el uso de otras técnicas, como los potenciales motores, tanto por estimulación eléctrica como magnética, así como el estímulo eléctrico directo y registro epidural, se constituyen como elementos simultáneos rutinarios de vigilancia transoperatoria en los grandes centros de cirugía de columna.

El principal objetivo de esta técnica es la detección oportuna de cualquier posible daño neurológico de manera rápida y, sobre todo, que permita que el compromiso sea reversible^{3,4} por medio del aviso inmediato al equipo quirúrgico, lo que le permitirá la modificación de la técnica quirúrgica para evitar morbilidad. Lo anterior se basa en la capacidad de esta técnica para identificar los diversos cambios de la actividad eléctrica neural cuando las estructuras son sometidas a tracción, compresión, isquemia o mal posicionamiento del paciente, lo que puede provocar déficit motor o sensitivo posoperatorio.⁵⁻⁷

Las cifras estimadas de daño neurológico permanente posquirúrgico después de una cirugía medular sin monitorización son muy variables de acuerdo con las diferentes series y patologías, sin embargo, se ha estimado que en tumores intramedulares fluctúa entre 23 y 65 %,⁸ en escoliosis o instrumentación espinal, entre 4.5 y 19.5 %,⁹ en lesiones radiculares, principalmente en pacientes a quienes se colocan tornillos pediculares, entre 10 y 18 %,¹⁰ y en cirugías de reparación aórtica, entre 1 y 16 %.¹¹

Con la vigilancia neurofisiológica transoperatoria por parte de personal altamente calificado y mediante el empleo combinado de potenciales evocados somatosensoriales, ya sea de nervios medianos y cubitales en miembros torácicos y peroneos o tibiales posteriores en miembros pélvicos,¹² potenciales evocados dermatomales a nivel cervical, torácico y lumbosacro, y potenciales motores, así como de la actividad electromiográfica continua, se ha conseguido reducir estas cifras a menos de 0.55 %,^{9,11} lo que justifica ampliamente el empleo de esta técnica.¹³

Los potenciales evocados somatosensoriales reflejan la integridad de los cordones posteriores y de los tractos espinotalámicos, es decir, solo de las vías sensitivas, por lo que no es recomendable utilizarlos como técnica única de vigilancia transoperatoria, ya que pueden existir lesiones transoperatorias en las vías motoras con un registro de potenciales evocados somatosensoriales totalmente normales,¹⁴ razón suficiente para recomendar la vigilancia simultánea de la vía corticoespinal por potenciales motores.¹⁵⁻¹⁷

La obtención de los potenciales motores se logra por la estimulación eléctrica de la corteza motora mediante la colocación de electrodos subdérmicos insertados en el cuero cabelludo del paciente, del tipo “sacacorchos”, o con agujas monopolares en

la región C1-C2 de acuerdo con la técnica 10-10 Internacional.¹⁸ La utilización de electrodos de superficie solo se recomienda cuando la inserción de electrodos en la piel no es posible, ya que esta modalidad requiere mayor intensidad para lograr una respuesta confiable.

En este artículo presentamos los resultados obtenidos en cirugía de columna vertebral y de médula espinal en el Centro Neurológico del Centro Médico ABC durante los años 2007 y 2008, y analizamos los resultados en los pacientes en quienes se contó con el apoyo neurofisiológico al realizar estas cirugías para evaluar la morbilidad posquirúrgica en la función nerviosa. Si bien numerosos centros hospitalarios en México ya disponen de la tecnología necesaria, este procedimiento aún no es un estándar, por lo que esperamos que la publicación de nuestra casuística motive el interés para su empleo rutinario en otros centros especializados.

Material y métodos

Estudio transversal, observacional y descriptivo que incluyó pacientes sometidos a cirugía de columna entre el 4 de enero de 2007 y el 19 de diciembre de 2008, en el Centro Neurológico del Centro Médico ABC, Campus Santa Fe, ciudad de México, en quienes fue solicitada la vigilancia neurofisiológica transoperatoria por sus médicos tratantes. Las variables a considerar fueron la región vertebral intervenida, las alertas emitidas por riesgo potencial a las estructuras nerviosas y la correlación electroclínica como índice predictivo de salida. Se obtuvo consentimiento informado de todos los pacientes, haciendo hincapié en la relación riesgo-beneficio al utilizar el procedimiento. La recolección de la información se obtuvo por los registros neurofisiológicos previamente obtenidos de cada paciente sometido a cirugía y del expediente clínico, en hojas de formato especial con los datos relevantes del objetivo del trabajo: morfología de las diferentes ondas obtenidas; latencias y voltaje de los potenciales evocados somatosensoriales, evocados dermatomales y motores; presencia de actividad irritativa durante la actividad electromiográfica continua espontánea; respuesta al estímulo eléctrico directo por parte del cirujano y ausencia de respuestas. Los datos se registraron en una base de Excel para su análisis ulterior.

Se realizó estudio neurofisiológico control preoperatorio en todos los pacientes, con excepción de aquellos en los que debido a su gravedad no fue posible practicarlo o por negativa expresa, sin embargo, el estudio fue repetido invariablemente a todos en la sala de operaciones después de la inducción anestésica.

La monitorización neurofisiológica se llevó a cabo con un equipo de potenciales evocados multisensoriales, con actividad electromiográfica continua y potenciales motores (marca XLTEK, modelo Protektor IOM, Ontario, Canadá) de 32 canales de adquisición, ocho canales de potenciales evocados somatosenso-

riales, ocho canales de actividad electromiográfica continua y ocho de potenciales motores con estimulación eléctrica cerebral transcraneal (figura 1).

En nuestro centro utilizamos de manera rutinaria el siguiente protocolo multimodal:

1. Potenciales evocados somatosensoriales de acuerdo con la región por intervenir, los cuales pueden ser medianos o cubitales para región cervical y tibiales posteriores y peroneos para las regiones torácica y lumbosacra.
2. Potenciales evocados dermatomales, los cuales se obtienen por estímulo y registro similar a los potenciales evocados somatosensoriales, con colocación de agujas monopolares en los dermatomas correspondientes a la región intervenida.¹⁹
3. Actividad electromiográfica continua de la musculatura correspondiente, lo que ayuda a identificar estímulos indeseados al instante sobre las raíces nerviosas, principalmente durante la disección quirúrgica²⁰ (figura 2).
4. Los potenciales motores se aplicaron con estímulos simples en cráneo, pareados o bien en forma repetitiva de 0.5 ms de duración, con frecuencia de 450 Hz y de intensidad individualizada hasta un máximo de 200 mA, como medida de seguridad. Una ventaja fue que los electrodos de registro de aguja que se utilizan para los potenciales motores son los mismos que para los potenciales evocados dermatomales. Los parámetros de adquisición son filtro de frecuencia baja de 10 Hz y alta de 1.5 Hz, con una sensibilidad entre 200 y 400 μ V/div y un tiempo de análisis de 20 ms/div.
5. Cuando fue necesario, además se realizó estimulación eléctrica de los tornillos pediculares, por medio de un estimulador que aplica el cirujano en forma directa sobre los mismos. Invariablemente se efectúan todas las técnicas descritas en

forma continua y simultánea, pudiendo ser alternadas conforme el momento quirúrgico. Las respuestas obtenidas fueron almacenadas en forma digital para su análisis posterior.

No utilizamos de manera rutinaria la estimulación y registro con electrodos epidurales, debido a la dificultad técnica que implican y para definir correctamente el lado que pudiese resultar afectado.

Un aspecto muy importante para obtener una óptima monitoreo neurofisiológico es que el anestesiólogo y el neurofisiólogo clínico mantengan comunicación estrecha durante al acto quirúrgico, ya que la información de las respuestas eléctricas del paciente son sensibles al uso de algunos fármacos. En los potenciales evocados somatosensoriales y los evocados dermatomales, las respuestas corticales son poco sensibles a los bloqueadores neuromusculares, pero se afectan con los fármacos inhalatorios. Los potenciales motores y la actividad electromiográfica continua requieren evitar el uso de relajantes musculares.²¹ Empleamos una técnica anestésica general balanceada combinando distintos medicamentos para disminuir el requerimiento de los mismos, a base de narcóticos (fentanil, remifentanilo), como inductor propofol, midazolam o etomidato; este último fármaco tiene, además, la propiedad de aumentar significativamente la amplitud de los potenciales obtenidos (lo cual puede adquirir gran importancia en ciertos pacientes);²² atracurio durante la inducción como relajante muscular; sevofluorano para mantenimiento narcótico y halogenado; y cuando se requiere, bolos de relajante muscular. También se utiliza la anestesia endovenosa total (inducción con dosis únicas de midazolam, propofol, sufentanilo o fentanilo y atracurio, y mantenimiento con infusiones continuas con bomba volumétrica de propofol y fentanilo o sufentanilo y una mezcla de aire y oxígeno, sin relajante muscular adicional).

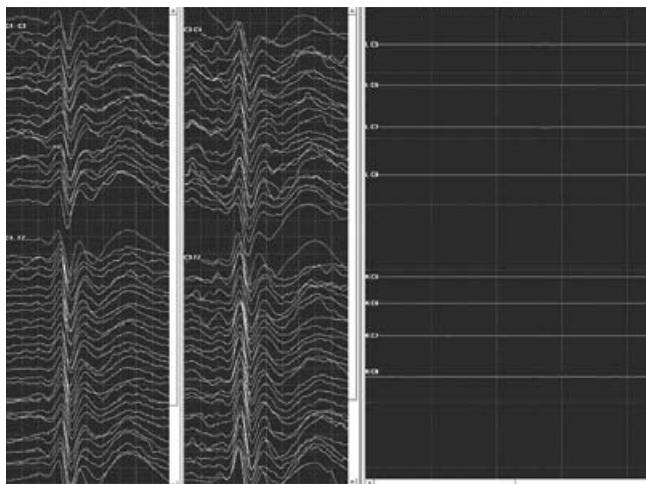


Figura 1. Registro normal que muestra potenciales evocados somatosensoriales de nervios medianos en forma consecutiva, y actividad electromiográfica continua con silencio eléctrico en los dermatomas C5 a C8 de ambos lados.

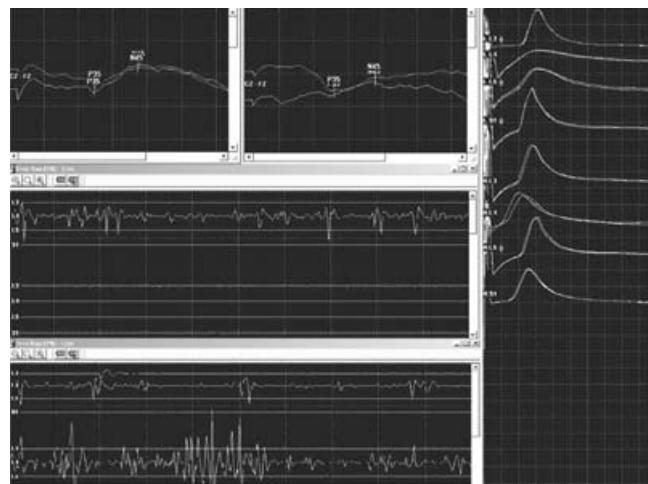


Figura 2. Registro que muestra actividad radiculogénica por tracción en raíz L4 bilateral con predominio izquierdo, con potenciales evocados somatosensoriales y potenciales motores dentro de límites normales.

En quienes se colocaron discos artificiales cervicales (19.2 % del total) o “jaulas” intervertebrales (23.3 %), al finalizar la cirugía el anestesiólogo realizó movimientos multidireccionales del cuello para verificar la existencia de irritación dermatomal en el registro neurofisiológico, como una medida adicional de seguridad. Cuando se documenta lesión de la duramadre en la cirugía, se mantiene al paciente en decúbito dorsal estricto al menos durante las primeras 24 horas.

Como criterios para riesgo de daño neurológico durante la intervención, se utilizan los recomendados por la Federación Internacional de Neurofisiología Clínica:²³

- Disminución en la amplitud del potencial medular mayor de 35 % o disminución en la amplitud del potencial cortical mayor de 50 %, que indica riesgo moderado de daño medular por compresión, isquemia o exceso de distracción.
- Pérdida completa y persistente de los potenciales, que indica alto riesgo de daño medular. Si la pérdida del potencial es transitoria durante varios minutos con una recuperación subsiguiente, no implica un alto riesgo de daño medular permanente.
- Para el potencial neurogénico no están bien definidos los criterios de riesgo, si bien en general se estima también una disminución de 50 %.

Resultados

De 351 pacientes, 135 fueron del sexo masculino (38.46 %) y 216 del femenino (61.54 %), el promedio de edad fue de 49.3 años, con límites que fluctuaron entre los 14 y 91 años.

El 82 % de los casos correspondió a patología osteodiscal, con o sin afectación medular, 12 % fue de etiología traumática, 4 % fue sometido a corrección de escoliosis y solo 2 % presentó alguna tumoración medular. De acuerdo con la localización, 62.1 % correspondió a patología lumbar, 33 % a cervical, 4.3 % a nivel dorsal y solamente 0.5 % a nivel sacro (cuadro I).

Durante la cirugía, 12.4 % de los pacientes presentó mejoría de la respuesta basal, principalmente en los potenciales evocados somatosensoriales y evocados dermatomales; 56.8 % de los casos los mantuvo similares a sus registros controles obtenidos preoperatoriamente; 28.4 % requirió llamada de alerta al cirujano de parte del neurofisiólogo durante la cirugía, principalmente

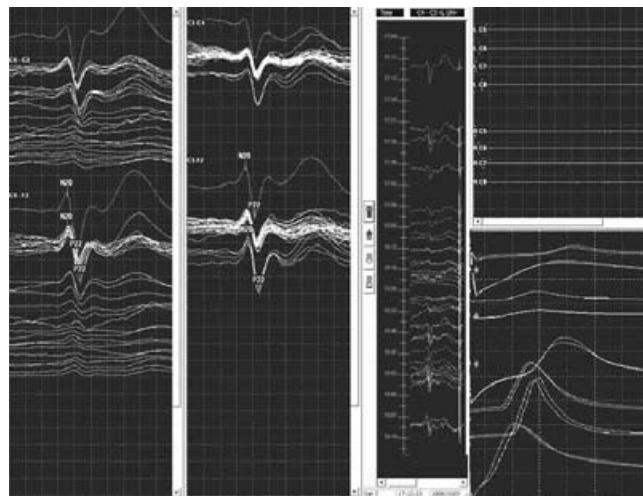


Figura 3. Severa depresión del voltaje de la respuesta somatosensorial (C4-Fz) y de los potenciales motores del lado derecho, con recuperación total después de 13 minutos de modificar la técnica quirúrgica.

por alargamiento de las latencias de los componentes o depresión del voltaje, o bien por irritación radicular excesiva de algún segmento en la actividad electromiográfica continua, durante la disección o por estimulación mecánica excesiva, de los cuales dos pacientes habían sido sometidos a descompresión cervical con colocación de “jaula” y requirieron recolocación de la misma al final de la cirugía, ya que durante la movilización del cuello presentaron potenciales neurogénicos significativos; solamente 2.4 % presentó caída severa transitoria tanto de los potenciales evocados somatosensoriales como de los potenciales motores, que requirió rectificación inmediata de la técnica quirúrgica (figura 3). En uno de estos casos se hizo necesario manejo integral para choque medular durante la cirugía al perderse todas las respuestas, tanto de los potenciales evocados somatosensoriales como de los potenciales motores, por lo que fue necesaria prueba de despertamiento, que demostró incapacidad para la movilización de miembros pélvicos, sin embargo, el paciente recuperó en forma total las respuestas de los potenciales evocados somatosensoriales y de los potenciales motores, así como la actividad motora *ad integrum* en la sala de recuperación, sin secuelas significativas 24 horas después de la cirugía (figura 4).

La suma de los casos que requirieron intervención de parte del equipo quirúrgico fue de 30.8 %, constituido por el número de pacientes con cambios por alargamiento de latencias o depresión del voltaje y los que presentaron ausencia transitoria de respuesta de los potenciales evocados somatosensoriales y potenciales motores. En ningún caso hubo pérdida permanente de respuestas en ninguna de las modalidades empleadas.

Se entrevistó a los pacientes en el momento del alta: 100 % refirió encontrarse igual o mejor clínicamente que en el momento del ingreso, aunque es importante mencionar que siete

Cuadro I. Localización por sexo

Localización	Total		Femenino		Masculino	
	n	%	n	%	n	%
Lumbar	218	62.1	122	34.8	96	27.3
Cervical	116	33.0	77	21.9	39	11.1
Dorsal	15	4.3	15	4.3	-	-
Sacro	2	0.5	2	0.5	-	-

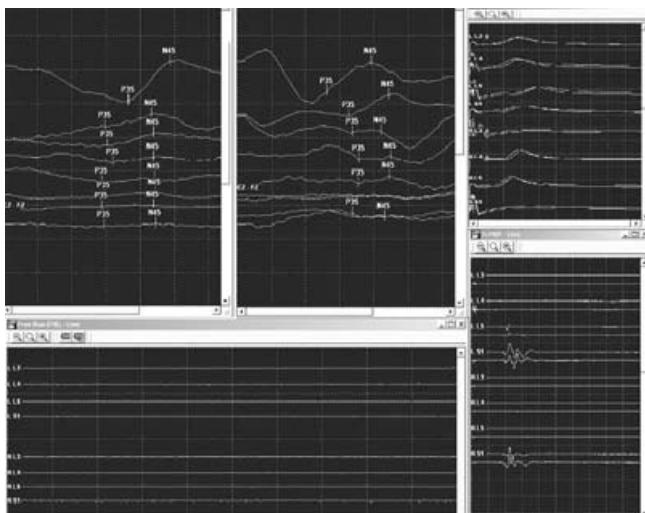


Figura 4. Depresión severa del voltaje de los potenciales evocados somatosensoriales de ambos nervios tibiales y de los potenciales motores en relación al registro control preoperatorio. El paciente presentó incapacidad para movilizar las extremidades durante la prueba de despertamiento, con recuperación 40 minutos después de la cirugía y manejo integral contra choque medular. No tuvo secuelas posquirúrgicas.

(1.7 %) presentaron cefalea de intensidad media a severa en el periodo posquirúrgico inmediato.

Finalmente, se puede considerar que en 30.8 % de los pacientes se evitó morbilidad de severidad variable que pudo haberse producido sin la identificación temprana, al haber alertado al cirujano durante la cirugía de la existencia de alteraciones en alguna de las modalidades de registro, según los criterios establecidos para riesgo de daño neurológico.

Discusión

El incremento de los pacientes con patología de columna vertebral en los últimos años se refleja en el cada vez mayor número de pacientes en el mundo sometidos a cirugía, lo cual aunado al desarrollo de abundante instrumentación invasiva para la corrección de las diversas patologías, ocasiona considerable cantidad de daños neurológicos posquirúrgicos permanentes,²³ sin embargo, estas lesiones se han reducido significativamente con el uso apropiado de la monitorización neurofisiológica transquirúrgica, principalmente cuando se emplean simultáneamente todas las técnicas de potenciales evocados somatosensoriales, potenciales evocados dermatomales, potenciales motores y actividad electromiográfica continua, ninguno por separado), una especificidad de 96 %, valor predictivo positivo de 96 % y valor predictivo negativo de 100 %.²⁷

Conclusiones

Con base en lo anterior podemos concluir que la vigilancia neurofisiológica transoperatoria integral es una herramienta segura y de inestimable valor en la cirugía de columna, que evitó posible daño neurológico hasta en 30.8 % de nuestros casos, que de otro modo hubiese pasado inadvertido durante el procedimiento quirúrgico. Su sensibilidad, especificidad y valor predictivo positivo fueron similares a los informados por otros autores en la literatura internacional.²⁹⁻³¹

Aunque este procedimiento es una herramienta más en la cirugía vertebromedular y al parecer se convertirá en rutinario, requerirá un proceso de difusión en nuestro medio para lograr su aceptación en los equipos quirúrgicos jóvenes.

bilidad para detección de daño radicular o, más trascendente aún, de la vía motora;²⁵ mientras que los potenciales motores valoran de manera integral la vía corticoespinal, lo que permite determinar el lado y nivel afectado, lo cual no sucede con el uso exclusivo de los electrodos epidurales. Sin embargo, debe tenerse especial cuidado con los potenciales motores al momento de su interpretación en el quirófano, ya que son fácilmente alterados por el uso de relajantes musculares y se debe proteger, además, la dentadura y la lengua del paciente.

En cuanto a la cefalea posquirúrgica referida por algunos pacientes, probablemente se deba al número e intensidad del estímulo eléctrico craneal para los potenciales motores aplicado de acuerdo a cada caso en particular, aunque también pudiera relacionarse con lesión de la duramadre en el transoperatorio en algunos pacientes.

La utilización de este protocolo en nuestro Centro Médico constituyó un poderoso factor predictivo de salida en cuanto al pronóstico clínico del paciente, ya que ningún caso en nuestra serie presentó secuela neurológica discordante con los datos neurofisiológicos obtenidos durante la cirugía y no se presentaron falsos negativos, lo cual es concordante con la literatura médica.^{25,26}

Otro aspecto importante es la tranquilidad que ofrece al cirujano el control sobre el daño que potencialmente pudiera causarse durante la cirugía y la toma de decisiones,²⁷ así como la protección médico-legal. Por otro lado, si se analiza la relación costo-beneficio, existen estudios que demuestran que el costo de la rehabilitación por daño neurológico en las cirugías medulares es cuantioso, lo que confirma el ahorro y beneficio que representan estas técnicas.^{27,28}

Nuestros resultados son acordes con los de las últimas series publicadas, que señalan una sensibilidad de 100 % (utilizando siempre de manera simultánea los potenciales evocados somatosensoriales, potenciales evocados dermatomales, potenciales motores y actividad electromiográfica continua, ninguno por separado), una especificidad de 96 %, valor predictivo positivo de 96 % y valor predictivo negativo de 100 %.²⁷

Agradecimientos

Por la alta calidad del trabajo técnico realizado en cada una de las cirugías de esta serie, al técnico en neurofisiología clínica Horacio Chávez, quien además colaboró en la recolección de los datos.

Referencias

- Vauzelle C, Stagnara P, Jouvinroux P. Functional monitoring of spinal cord activity during spinal surgery. *Clin Orthop Rel Res* 1973;93:173-178.
- Nuwer MR, Dawson EC. Intraoperative evoked potential monitoring of the spinal cord. A restricted filter, scalp method during Harrington instrumentation for scoliosis. *Clin Orthop Relat Res* 1984;183:42-50.
- Padberg AM, Thuet ED. Intraoperative electrophysiologic monitoring: considerations for complex spinal surgery. *Neurosurg Clin North Am* 2006;17:205-226.
- Franco-Caredo C, Villalibre I, González-Hidalgo M. Protocolo de monitorización neurofisiológica intraoperatoria de la médula espinal. *Rev Neurol* 1999;28:583-587.
- Collado-Corona MA, Paul Shkurovich-Bialik, Collado-Ortiz MA, Shkurovich-Zaslavsky M. Lesiones perioperatorias en nervios periféricos de extremidades inferiores. *Cir Cir* 2003;71:329-334.
- Avellanal-Salas S, De Blas-Beorlegui G, Castilla-Garrido JM, Conill JJ, Cortés V, Chaparro-Hernández P, et al. Guía práctica para la realización de la monitorización neurofisiológica de la cirugía de la columna. *Rev Neurol* 2004;38:879-885.
- Krassioukov AV, Sarjeant R, Arkia H, Fehlings MG. Multimodality intraoperative monitoring during complex lumbosacral procedures: indications, techniques, and long-term follow-up review of 61 consecutive cases. *J Neurosurg (Spine)* 2004;1:243-253.
- Costa P, Bruno A, Bonzanino M, Massaro F, Caruso L, Vincenzo I, et al. Somatosensory- and motor-evoked potential monitoring during spine and spinal cord surgery. *Spinal Cord* 2007;45:86-91.
- Schwartz DM, Auerbach JD, Dormans JP, Flynn J, Drummond DS, Bowe JA, et al. Neurophysiological detection of impending spinal cord injury during scoliosis surgery. *J Bone Joint Surg Am* 2007;89:2440-2449.
- Maguire J, Wallace S, Madiga R, Leppanen R, Draper V. Evaluation of intrapedicular screw position using intraoperative evoked electromyography. *Spine* 1995;20:1068-1074.
- De Haan P, Kalkman CJ. Spinal cord monitoring: somatosensory and motor evoked potentials. *Anesthesiol Clin North Am* 2001;19:923-945.
- Nuwer MR, Dawson EG, Carlson LG, Kanim LE, Sherman JE. Somatosensory evoked potential spinal cord monitoring reduces neurologic deficits after scoliosis surgery: results of a large multicenter survey. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1995;96:6-11.
- Pérez-Orríbo L, Pérez-Lorensu PJ, Roldán-Delgado R, García-Conde M, Spreáfico M, García-Marín V. Monitorización neurofisiológica intraoperatoria de la médula espinal: nuestra experiencia. *Rev Neurol* 2008;47:236-241.
- Lesser RP, Raudzens PA, Lueders H, Nuwer MR, Goldie WD, Morris HH, et al. Postoperative neurological deficits may occur despite unchanged intraoperative somatosensory evoked potentials. *Ann Neurol* 1986;19:22-25.
- Bartley K, Woodforth IJ, Stephen JPH, Burke D. Corticospinal volleys and compound muscle action potentials produced by repetitive transcranial stimulation during spinal surgery. *Clin Neurophysiol* 2002;113:78-90.
- Costa P, Bruno A, Bonzanino M, Massaro F, Caruso L, Vincenzo I, et al. Somatosensory- and motor-evoked potential monitoring during spine and spinal cord surgery. *Spinal Cord* 2007;45:86-91.
- Jameson LC, Sloan TB. Monitoring of the brain and spinal cord. *Anesthesiol Clin* 2006;24:777-791.
- Watanabe K, Watanabe T, Takahashi A, Saito N, Hirato M, Sasaki T. Transcranial electrical stimulation through screw electrodes for intraoperative monitoring of motor evoked potentials. Technical note. *J Neurosurg* 2004;100:155-160.
- Tsai RY, Yang RS, Nuwer MR, Kanim LE, Delamarter RB, Dawson EG. Intraoperative dermatomal evoked potential monitoring to predict outcome from lumbar decompression surgery. *Spine* 1997;22:1970-1975.
- Holland NR, Kostuik JP. Continuous electromyographic monitoring to detect nerve root injury during thoracolumbar scoliosis surgery. *Spine* 1997;22:2547-2550.
- Valverde-Junguito JL, Aldana-Díaz EM, Pérez-Lorensu PJ, González-Miranda F. Anesthetic and physiologic implications of neurophysiologic monitoring with evoked potentials during spinal surgery. *Rev Esp Anestesiol Reanim* 2007;54:231-241.
- Collado-Corona MA. Editorial. Vigilancia neurofisiológica transquirúrgica. *Acta Ped Mex* 1999;20:1-2.
- Burke D, Nuwer MR, Daube J, Fischer C, Schramm J, Yingling CD, et al. Intraoperative monitoring. In: Deuschl G, Eisen A, eds. *Recommendations for the Practice of Clinical Neurophysiology: Guidelines of the International Federation of Clinical Neurophysiology*. Amsterdam: Elsevier Health Sciences; 1999. pp. 133-148.
- Delank KS, Delank HW, König DP, Popken F, Furderer S, Eysel P. Iatrogenic paraplegia in spinal surgery. *Arch Orthop Trauma Surg* 2005;125:33-41.
- Gunmarsson T, Krassioukov AV, Sarjeant R, Fehlings MG. Real-time continuous intraoperative electromyographic and somatosensory evoked potential recordings in spinal surgery: correlation of clinical and electrophysiologic findings in a prospective, consecutive series of 213 cases. *Spine* 2004;29:677-684.
- Kelleher MO, Tan G, Sarjeant R, Fehlings MG. Predictive value of intraoperative neurophysiological monitoring during cervical spine surgery: a prospective analysis of 1055 consecutive patients. *J Neurosurg* 2008;8:215-221.
- Wiedemayer H, Fauser B, Sandalcioglu IE, Schafer H, Stolke D. The impact of neurophysiological intraoperative monitoring on surgical decisions: a critical analysis of 423 cases. *J Neurosurg* 2002;96:255-262.
- Kombos T, Suess O, Brock M. Cost analysis of intraoperative neurophysiological monitoring (IOM). *Zentralbl Neurochir* 2002;63:141-145.
- Costa PB, Bruno A, Bonzanino M, Massaro F, Caruso L, Vincenzo I, et al. Somatosensory- and motor-evoked potential monitoring during spine and spinal cord surgery. *Spinal Cord* 2007;45:86-91.
- Sala F, Bricolo A, Faccioli F, Lanteri P, Gerosa M. Surgery of intramedullary spinal cord tumors: the role of intraoperative (neurophysiological) monitoring. *Eur Spine J* 2007;16(Suppl 2):S130-139.
- Nuwer MR. Intraoperative monitoring of the spinal cord. *Clin Neurophysiol* 2008;119:247.