

Treball de recerca

Convocatoria junio 2013

**Validez de la monitorización neurofisiológica
intraoperatoria en la cirugía de columna lumbosacra**

Autor: María Elena Cánovas Casado

Dirección: Antonio Escartín Siquier

*Departamento de Medicina
Universidad Autónoma de Barcelona
Servicio de Neurología- Hospital Sant Pau*

ÍNDICE

Resumen	3
Introducción.....	4
Material y método.....	7
Resultados.....	23
Discusión.....	28
Conclusiones.....	33
Bibliografía.....	34

RESUMEN

Introducción

La monitorización neurofisiológica intraoperatoria se ha convertido en una prueba importante para evitar lesiones del sistema nervioso. Nuestro objetivo es conocer la validez de ésta en la cirugía de raíces nerviosas bajas.

Material y método

Se llevó a cabo un estudio con 60 pacientes sometidos a cirugía de raquis que comprometía niveles comprendidos entre las raíces L3 y S2. Durante la monitorización se tuvieron en cuenta dos criterios como alarma: la presencia de descargas neurotónicas de más de un minuto de duración y el registro de potenciales de unidad motora en la musculatura dependiente de la raíz afecta al estimular los tornillos pediculares a menos de 12 mA. Se realizó una valoración clínica y electromiográfica preoperatoria y una evaluación similar a las 6 semanas tras la intervención.

Resultados

Durante toda la intervención no se registraron descargas neurotónicas en ningún paciente, pero aparecieron signos de alarma al testar 12 tornillos pediculares llevándose a cabo la recolocación de 10 de éstos. En 2 de los pacientes en los que se llevó a cabo la recolocación de los tornillos aparecieron nuevas lesiones asociadas y ninguno de los 2 pacientes en los que no se sustituyó el tornillo presentó nueva lesión neurológica.

Conclusión

La aparición de un 20% de nuevas radiculopatías y la baja tasa de falsos negativos demuestra que nos encontramos ante una prueba sensible pero poco específica, planteándonos tanto una dudosa validez del barrido libre continuo como la necesidad de valorar de una forma más estricta el concepto de descarga neurotónica.

INTRODUCCIÓN

La fusión lumbar intersomática se ha convertido en un enfoque cada vez más empleado como terapéutica a la clínica discogénica de espalda y la inestabilidad de columna. Se han planteado preocupaciones en relación con la morbilidad asociada a este procedimiento ya que el paciente queda expuesto a lesiones neurológicas visibles o no evidentes a la inspección directa durante la cirugía. El proceso quirúrgico se puede dividir en distintas etapas que incluyen: el abordaje quirúrgico, la colocación de tornillos pediculares, la descompresión radicular, la colocación de barras, la administración de corticoides intratecales y el cierre del campo. Durante las fases de colocación de tornillos pediculares y descompresión de las raíces nerviosas se dispara el riesgo de lesión radicular por lo que, es en estos dos periodos, en los que ha de existir meticulosa y continua visualización del proceso, especialmente de aquellas raíces potencialmente expuestas a un mayor riesgo lesivo. En la literatura se ha descrito de un 5 a un 10% de pacientes sometidos a cirugía lumbosacra en los que ha tenido lugar una malposición de tornillos pediculares [36, 37, 38], siendo la lesión nerviosa (incluyendo la durotomía), la pseudoartrosis y la afectación de niveles adyacentes las complicaciones descritas secundarias a esta iatrogenia [15]. Para evitar estas afectaciones se han desarrollado diferentes técnicas como son la estereotáctica guiada [34, 35] o la fluoroscopia guiada [33], cuyos principales inconvenientes son: la exposición a la radiación a la que se ve sometida el personal, aumento del tiempo intraoperatorio, equipamiento caro y, consecuentemente, aumento del gasto sanitario. Es por ello por lo que la monitorización neurofisiológica intraoperatoria ha pasado a ser la técnica de elección a la hora de exponer al paciente sometido a cirugía lumbosacra al riesgo potencial que este proceso conlleva.

La monitorización intraoperatoria fue presentada por primera vez por Calancie y colaboradores [32] en el año 1992, cuyo propósito era realizar una monitorización objetiva de las raíces durante la colocación de los tornillos pediculares con el fin de notificar al cirujano una adecuada posición de éstos. Se trata de un procedimiento continuado, en tiempo real, de detección precoz de posibles lesiones durante el acto quirúrgico que puedan poner en riesgo las estructuras neurales; por lo tanto, nos da una información dinámica acerca del estado de los axones motores, a la vez que resulta un elemento importante para poder realizar una cirugía más agresiva sin que ello suponga un riesgo para el paciente. Su objetivo final es identificar estructuras y guiar al cirujano

en la extensión de la corrección, con el fin de advertir al equipo quirúrgico de una situación de alerta para que pueda decidir la actuación más pertinente. Esta técnica ha evolucionado para hacer frente al riesgo de lesión neural en una amplia variedad de cirugías, ampliándose por ello al uso de otras pruebas que se pueden realizar de manera continuada o repetitiva [electromiografía (EMG), potenciales evocados (PE), electroencefalografía (EEG) y estimulación eléctrica transcraneal (EET)], en cuyo caso se hablaría de monitorización intraoperatoria multimodal. Así, se hará uso de forma complementaria de las diferentes técnicas neurofisiológicas intraoperatorias conocidas, en función de la estructura del sistema nervioso que quede expuesta potencialmente a lesión.

A la hora de evaluar una prueba diagnóstica como es la monitorización intraoperatoria, resultan de gran importancia tanto la fiabilidad o capacidad de la prueba para reflejar el grado de concordancia que es capaz de proporcionar al repetir su aplicación en condiciones similares, como su validez o grado en que la prueba clasifica correctamente a los pacientes en función de que exista o no lesión real y cuyos elementos de medida serían la sensibilidad y especificidad; la ausencia de fiabilidad y/o validez de una prueba conllevaría a un error que, si es lo suficientemente importante, puede alterar el resultado de la monitorización intraoperatoria de forma significativa. Así, conceptualmente, la monitorización intraoperatoria es una prueba diagnóstica en la que debe existir un equilibrio adecuado entre sensibilidad y especificidad con el fin de ayudar al cirujano en el proceso de prevención de lesiones nerviosas sin que ello suponga una interrupción innecesaria durante el proceso quirúrgico; a su vez, ha de presentar un elevado valor predictivo positivo (VPP) y negativo (VPN) con el fin de mejorar la calidad de la práctica clínica. Para ello se han de definir una actividad EMG significativa o criterios de alarma que se denominan descargas neurotónicas, cuya presencia sea un indicador sensible de irritación de las raíces lumbosacras y, consecuentemente, de potencial daño neurológico a la vez que no disparen el número de pacientes falsos positivos.

Presentamos un estudio que busca analizar la utilidad de la monitorización intraoperatoria en la toma de decisiones durante la cirugía de raquis con manipulación de las raíces lumbares y sacras comprendidas entre L3 y S2, además de conocer su influencia en el resultado postquirúrgico; o, dicho de otra manera, pretendemos determinar la validez de monitorización neurofisiológica intraoperatoria en la detección de lesiones radicales durante este procedimiento.

Así, los objetivos del estudio son:

- Conocer los signos de alerta durante la monitorización intraoperatoria en cirugía de raquis lumbosacra.
- Evaluar la sensibilidad, especificidad, VPP y VPN de este tipo de cirugía con el fin de conocer la validez con la que se advierte al cirujano acerca de una lesión neurológica intraoperatoria.

MATERIAL Y MÉTODO

POBLACIÓN Y ESTUDIO

Se realizó un estudio de prospectivo de cohortes que incluyó un total de 60 pacientes intervenidos por la Unidad de Raquis del Hospital General de Castellón que fueron monitorizados por el Servicio de Neurofisiología Clínica del mismo hospital mientras eran sometidos a cirugía de columna lumbosacra por implicación de alguno o varios de los niveles comprendidos entre las raíces L3 y S1. La clínica referida por los pacientes fue: dolor lumbar, hipoestesia y/o debilidad de uno o ambos miembros inferiores. Los candidatos a cirugía eran, generalmente, pacientes con buena calidad de vida y clínica resistente a tratamiento farmacológico y rehabilitador, evaluando estos puntos a criterio del cirujano. Las indicaciones para la cirugía fueron: (a) dolor discogénico por degeneración discal, hernia discal protruida o hernia discal extruida en un 35 % de los casos (21 pacientes), (b) estenosis de canal lumbar o lumbosacro en un 56.66 % de los casos (34 pacientes de los cuales 5 presentaban reestenosis por fibrosis postquirúrgica previa) y (c) dolor lumbar o lumbosacro por inestabilidad secundaria a desplazamiento de una vértebra sobre la vértebra inmediatamente inferior a ésta (espondilolistesis) [18], que se presentó en el 8.33% de los casos (5 pacientes) en los que existía asociada una degeneración discal y deterioro de las articulaciones facetarias contribuyendo a ello la distensión ligamentosa y la fatiga muscular. La meta de esta cirugía era actuar sobre las articulaciones afectadas y discos degenerados con el fin de devolver el equilibrio en los planos sagital y coronal.

MÉTODOS DE EVALUACIÓN

La monitorización neurofisiológica se aplicó en aquellos pacientes en los que el cirujano consideró que existía un riesgo importante de lesión radicular; se llevó a cabo como parte de la atención clínica de rutina en estos casos siguiendo el protocolo estándar de la práctica, acompañada de una valoración clínica y electromiográfica prequirúrgica (de 1 a 7 días previos a la intervención) y postquirúrgica (6 semanas después de la intervención).

a) Estudio prequirúrgico. Comprendía:

a.1) evaluación traumatológica. Las tres causas orgánicas más frecuentes de dolor lumbar son:

1.- Síndrome miofascial. Por estiramiento súbito de la musculatura se produce un desgarro de las fibras musculares ocasionando dolor y contractura muscular, dando lugar a un espasmo muscular (por lesión de las fibras intrafusales) que se extiende a músculos vecinos. Es la causa más frecuente de lumbalgia.

2.-Estenosis de canal lumbar. La fisiopatogenia del dolor por irradiación, compresión o estiramiento de las raíces del plexo lumbosacro (en particular de L5 y S1) depende de problemas degenerativos, inflamatorios, congénitos traumáticos, psicógenos, vasculares o tumorales. La estenosis de canal lumbar es más frecuente en pacientes mayores de 40 años, y se debe a una compresión radicular por estrechamiento crónico del receso y el canal lateral y/o del canal central a varios niveles, debida a osteofitos e hipertrofia facetaria (espondiloartrosis/artrosis) degenerativa e inflamatoria. Algunos pacientes pueden presentar neuropatías metabólicas o tóxicas con síntomas parecidos. Estudio de resonancia magnética nuclear (RMN) lumbar realizados por otras causas en individuos que nunca han presentado dolor lumbar o cialgia han demostrado que el 40% de pacientes con 40 años presentan una o más imágenes de hernia discal, y el 60% de pacientes asintomáticos con 60 años presentan estenosis lumbar imagenológica sin clínica acompañante [17].

3.- Compresión radicular aguda o subaguda por la ruptura y dislocación del núcleo pulposo del disco intervertebral. Este proceso es más frecuente en pacientes menores de 20 años.

a.2) evaluación preanestésica.

a.3) estudio de imagen: radiografía dinámica anteroposterior y lateral de columna lumbosacra para considerar las áreas de inestabilidad, y RMN de columna lumbosacra para evaluar áreas de estenosis y degeneración discal. A pesar de ello, la asociación entre los hallazgos en la RMN y el dolor axial es muy limitado [17]. La hernia central puede afectar a más de una raíz; la hernia posterocentral (receso lateral) comprime la raíz que sale por el foramen del nivel inferior; la hernia en el canal lateral (foramen) puede comprimir la raíz de su propio nivel si se desplaza hacia arriba, pero también puede involucrar a la raíz que desciende hacia el nivel inferior; la hernia discal en el compartimento laterodistal (extraforaminal) puede comprimir al nervio tanto a lo largo de su trayecto antes de la salida de la raíz como a este último nivel.

a.4) estudio neurofisiológico: comprendía una adecuada evaluación clínica (anamnesis, valoración de reflejo aquileo, rotuliano y cutáneo plantar bilateral, evaluación de la

sensibilidad táctil superficial y balance muscular de miembros inferiores) y un estudio electroneurográfico (ENG) y electromiográfico (EMG) personalizado, según la localización de la lesión, en el que se valoraba: (a) ENG sensitiva, con el fin de demostrar la normalidad de las conducciones sensitivas y descartar otra patología subyacente; (b) ENG motora, para evaluar la amplitud del CMAP sobre la musculatura cuya inervación procediera de la raíz afecta con el fin de conocer el grado compromiso de las fibras radiculares; (c) EMG convencional con aguja simple bipolar con el fin de conocer el número de niveles afectados, la uni/bilateralidad y, principalmente, el tiempo de evolución de la lesión (signos de reinervación valorando la inestabilidad o estabilidad de las unidades para conocer su carácter subagudo o crónico, así como la existencia de actividad espontánea).

b) Seguimiento intraoperatorio. Las raíces nerviosas pueden lesionarse durante todo el proceso de instrumentación y, en mayor medida, durante la descompresión radicular y la colocación de tornillos pediculares. Por ello, la función de las raíces lumbares y sacras se controló de manera continuada durante toda la cirugía y, en especial, durante estas dos fases.

c) Un estudio postoperatorio a las 6 semanas de la intervención en el que se evaluaba nuevamente la clínica mediante anamnesis y exploración física y el estudio ENG/ EMG para conocer los cambios postquirúrgicos.

CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Los criterios que se tuvieron en cuenta fueron:

a) Criterios de inclusión.

Pacientes sometidos a cirugía lumbar o lumbosacra que involucraba niveles comprendidos entre L3 y S2 y, a criterio del cirujano, requerían monitorización intraoperatoria.

b) Criterios de exclusión

b.1) Ausencia de estudio EMG pre o post-quirúrgico.

b.2) Monitorización EMG asociada a PESS o PEM durante la intervención.

b.3) Complicaciones post-quirúrgicas. Quedaron excluidos aquellos pacientes que presentaron complicaciones en el postoperatorio inmediato que pudieran influir en el resultado de la EMG, como es el caso de infección.

TÉCNICA QUIRÚRGICA

Debido a la complejidad de esta cirugía es necesaria una planificación quirúrgica previa. Al inicio de realizarse este tipo de cirugía, las artrodesis eran posteriores interespinosas, posteriormente interlaminares y después intertransversas o intraarticulares hasta llegar a realizar artrodesis anteriores por vía anterior (ALIF) o por vía posterior (PLIF) o anteriores y posteriores (artrodesis circular). Los sistemas de sujeción o estabilización han evolucionado desde los alambres sublaminares, a tornillos pediculados solos o unidos a barras longitudinales pudiendo realizar correcciones segmentarias, placas anteriores atornilladas en caso de reconstrucción del cuerpo vertebral o cajas intersomáticas. En nuestro caso se llevó a cabo en todos ellos una estabilización a través de artrodesis o fusión intersomática anterior (ALIF en 2 pacientes) o posterior (PLIF en 58 pacientes) con o sin descompresión radicular. El 100 % de ellos se sometieron a colocación de tornillos pediculares.

Por ello, una vez intubado el paciente, se coloca en decúbito prono (PLIF) o supino (ALIF) para realizar el abordaje quirúrgico. La vía de abordaje más usada es la posterior, que se resume en:

- 1.- Colocación del paciente en decúbito prono
- 2.- Localización de las apófisis e incisión
- 3.- Disección por planos hasta alcanzar las apófisis espinosas.
- 3.- Exposición de los espacios interlaminares
- 4.- Colocación de tornillos
- 5.- Descompresión de raíces
- 6.- Testar tornillos
- 7.- Colocación de barras sobre los tornillos y fijación de la artrodesis (injerto autólogo o sintético)
- 8.- Aplicación de agentes hemostáticos de contacto activo, materiales de barrera para la inhibición de la adhesión postquirúrgica y administración de corticoide intratecal.
- 9.- Cierre por planos
- 10.- Administración de profilaxis antibiótica y antitrombótica.

BLOQUEANTES NEUROMUSCULARES

En comparación con la EMG convencional, la monitorización intraoperatoria presenta una serie de desafíos que la dificultan:

- Anestesia: en quirófano, el paciente se encuentra bajo el efecto de miorrelajantes o bloqueantes neuromusculares que resultan beneficiosos para no obtener movimiento y artefacto muscular, pero suprimen la señal muscular que podría ser signo de alarma [1].
- Imposibilidad de acceso y ajuste de electrodos en caso de que se movilicen debido a la esterilidad del campo quirúrgico.
- Las señales eléctricas de movimientos o del bisturí así como el manejo del paciente, producen descargas que se han de saber distinguir de una lesión neural.
- Otro tipo de condiciones pueden alterar la respuesta, como son la presión arterial, temperatura, medicamentos, electrolitos o la pérdida de sangre.

Los bloqueantes neuromusculares proporcionan unas condiciones operatorias óptimas y acortan la duración del acto quirúrgico. Cuando se utilizan de manera rutinaria, la monitorización de su efecto bloqueante es extremadamente importante ya se unen a los receptores y bloquean la transmisión nerviosa a nivel de la placa por lo que una excesiva relajación muscular impediría realizar una correcta monitorización intraoperatoria. Por este motivo, se recomiendan miorrelajantes de vida corta una vez que el cirujano abre el campo y se procede al proceso de descompresión.

En todos los pacientes en los que llevamos a cabo la monitorización intraoperatoria se administró:

- a) Succinilcolina endovenosa para facilitar la intubación (vida media de 1-3 minutos). Se trata de un bloqueador neuromuscular despolarizante, por lo que posee alta actividad intrínseca (agonista) y alta persistencia de la unión fármaco – receptor, siendo suficiente la activación de un 10 % de los receptores postsinápticos para desestabilizar y despolarizar la sinapsis originando el bloqueo de la transmisión neuromuscular, lo que explica su rapidez de acción. Al desaparecer la acción del bloqueante neuromuscular despolarizante, la membrana postsináptica recupera el potencial de reposo permitiendo la propagación de posteriores potenciales de placa terminal [31].
- b) Cisatracurio: se administró inmediatamente antes de la intubación en bolo vía endovenosa y posteriormente, durante la intervención, se mantuvo una bomba de infusión continua evitando el uso de bolos con el fin de que no se produjera una relajación excesiva que impidiera una adecuada monitorización intraoperatoria. Así, durante la primera hora (vida media del bolo) se comprobó periódicamente el nivel de relajación mediante el denominado tren de cuatro por el que se evaluaba el grado de relajación muscular, de tal manera que si la respuesta se hacía más decremental o desaparecía algún PRM (CMAP) se pedía una disminución de la dosis administrada por

bomba. La aparición de los bloqueantes neuromusculares de efecto de corta duración (cisatracurio, vecuronio, atracurio, rocuronio o mivacurio) ha aumentado la necesidad de monitorizar la transmisión neuromuscular. El cisatracurio es un bloqueante neuromuscular no despolarizante y, por lo tanto, actúa impidiendo el acceso de la acetilcolina a los receptores (antagonismo); así, cuando se ocupa una proporción suficiente de receptores, disminuye la transmisión neuromuscular de manera proporcional al número de receptores ocupados, siendo necesaria una ocupación mayor del 80% de los receptores para que disminuya esta actividad y un 90% de los receptores para que se establezca el bloqueo. Las moléculas de acetilcolina sobreviven lo bastante como para interactuar con el receptor, pero éste lo pueden encontrar libre u ocupado por el cisatracurio; el resultado es que la suma de los sucesos elementales que constituyen el potencial de placa terminal se reducen en amplitud y el potencial de placa terminal puede caer por debajo del umbral al que se dispara el potencial de acción para desencadenar la contracción, quedando el músculo paralizado [31]. Estas moléculas de acetilcolina que sobreviven, se unirán al receptor una vez que quede libre de tal manera que aumentará el potencial de placa motora en amplitud pudiendo alcanzar un umbral al que se dispara el potencial de acción que nosotros registramos.

Por lo tanto, la monitorización intraoperatoria requiere un equipo multidisciplinar en el que son fundamentales el cirujano, el anestesista y el neurofisiólogo.

TÉCNICA PARA EL SEGUIMIENTO ELECTROMIOGRÁFICO

La máquina utilizada para la monitorización era Medelec Synergy de 8 canales.

El material utilizado fue:

a) Aguja monopolar subdérmica para el registro EMG de barrido libre o continuo. Se utilizó un registro EMG de barrido libre hasta que finalizó la cirugía una vez realizada la sutura. Antes de comenzar la cirugía, una vez que el paciente se situaba sobre el campo quirúrgico anestesiado y posicionado en supino, se procedió a la colocación de dos electrodos de aguja monopolar de 0.35 x 18 mm en el vientre muscular de la musculatura dependiente de las raíces de interés, comprendidas entre L3 y S2 bilateral: vastus laterales (L3/L4), tibialis anterior (L4/L5), peroneus longus (L5/S1) y gastrocnemius medialis (S1/S2); en cada músculo se colocó uno electrodo activo en la masa muscular y el otro como referencia en la vecindad, ambos sujetos con esparadrapo para evitar su movilización. Una vez que el paciente era colocado adecuadamente en supino y antes de iniciar el aislamiento del campo quirúrgico, se

procedió a la conexión de los cables de estas agujas al cabezal integrado en el equipo, en el que estaba programado la localización exacta de cada electrodo. Los parámetros que se utilizan durante el registro fueron:

- Osciloscopio o tiempo de barrido con un tiempo de análisis de 250 ms/división.
- Sensibilidad de 100 μ V
- Filtro o ancho de banda comprendido entre 10 Hz y 1.5 kHz.

Resulta importante que, la línea de base no superara los 20 μ V con el fin de que no pasaran desapercibidas descargas neurotónicas dando lugar a falsos negativos. El criterio de alarma fue la presencia de descargas neurotónicas de más de un minuto de duración.

b) Una aguja subdérmica como electrodo de aguja de tierra (monopolar) situado en un músculo gastrocnemius derecho o izquierdo.

c) Agujas subdérmicas monopolares para el tren de cuatro. A los pacientes se les administró durante el procedimiento dos bloqueantes neuromusculares: succinilcolina y cisatracurio. Con el fin de comprobar el grado de relajación muscular y la ausencia de bloqueo neuromuscular se llevó a cabo una serie de cuatro estímulos de pulsos bifásicos denominados test de “tren de cuatro”, introducido en el año 1971 para cuantificar el debilitamiento muscular y utilizarlo como método de medición del bloqueo. Para ello insertaron dos electrodos de aguja en cada miembro inferior (en ambos para asegurar el poder realizarlo en el otro lado en caso de error técnico en alguno de ellos): uno distal en la dirección del estímulo entre peroné y gastrocnemius lateralis y otro proximal y paralelo a esta localización con el fin de estimular el nervio peroneal superficial. Por otro lado, se procedió al registro de la respuesta sobre el músculo peroneus longus ipsilateral gracias a los electrodos de aguja insertados para monitorizar el barrido libre sobre este músculo.

Los parámetros utilizados fueron:

- Tiempo de barrido de 50 ms/división.
- Intensidad del estímulo de 50 mA.
- Frecuencia del estímulo de 1 pps (pulso por segundo)
- Duración del estímulo de 0.1 ms

Para conseguir esto es imprescindible que el estimulador desarrolle una intensidad de 50 a 60 mA, por pulso, en todas las frecuencias del estímulo. De esta manera, se realizaba el tren de cuatro o estimulación repetitiva provocando un estímulo supramaximal de 50 mA sobre el nervio peroneal recogiendo la respuesta sobre la unión neuromuscular del

peroneo lateral largo ipsilateral, con el fin de comprobar el nivel de relajación muscular, siendo variable el número de respuestas CMAP registradas. La primera respuesta del tren de cuatro no está condicionada y posee todas las ventajas de las respuestas a una estimulación única; se puede utilizar como referencia siempre y cuando no haya sido precedido de otro estímulo 10 segundos antes ya que en este caso los valores obtenidos serían menores a los reales ya que, además de presentar una disminución del denominado factor o margen de seguridad (exceso de amplitud sobre el valor umbral del potencial de placa motora, capaz de poner en marcha el potencial de acción de la fibra muscular (7-20 mV) por ocupación farmacológica de los receptores de acetilcolina, ya que no ha existido aún una recaptación total de la acetilcolina liberada. En base a lo descrito, entre otros, por Holland [10], Lennon [12] y Minan [13] se puede monitorización EMG intraoperatoria como máximo con un 75 % de bloqueo neuromuscular ya a partir de esta cifra desciende la sensibilidad de la monitorización EMG para la detección de lesión radicular. Cuatro respuestas marcarían una ausencia prácticamente completa de relajación, tres respuestas una relajación del 75%, dos respuestas una relajación del 80% y una respuestas una relajación del 90%. La ausencia de respuestas marcaría una relajación profunda lo que supondría un riesgo al no poder registrar la manipulación real de las raíces. Así, la acción del bloqueante neuromuscular sobre el tono muscular fue evaluada mediante la presencia de cuatro contracciones musculares del tren de cuatro del nervio peroneal, desapareciendo esta miorelajación (mínimo de una respuesta del tren de cuatro) antes de comenzar con la manipulación de la columna propiamente dicha, con el fin de realizar un seguimiento fiable de la actividad EMG, ya que la electromiografía no puede ser registrada con la presencia de fármacos que bloquean el sistema neuromuscular (miorelajantes) ya que, al silenciar la actividad muscular, no se registra la irritación mecánica o la estimulación eléctrica y, por lo tanto, no se podrán conocer las lesiones que se están produciendo sobre la raíz. De ahí la importancia de comprobar periódicamente el nivel de relajación con el tren de cuatro y si la respuesta se hace más decremental o desaparece algún PRM (CMAP), pedir al anestesista una disminución de la dosis administrada por la bomba. Por otro lado, la compresión nerviosa crónica puede aumentar la sensibilidad a los efectos de los bloqueadores neuromusculares [11].

Se ha de tener en cuenta que la ausencia o disminución de la respuesta del potencial de acción del músculo puede deberse a: excesiva relajación muscular (al inicio de la intervención era posible no encontrar respuesta alguna como consecuencia del nivel de

relajación al que estaba sometido al paciente), anestesia, baja intensidad de la corriente, fallo en las conexiones o parámetros inapropiados o elevada resistencia eléctrica de determinados tornillos [3]. Por lo tanto, la presencia de los PRM en el tren de cuatro valida el uso de la EMG de barrido libre continuo y la estimulación con tornillos. Además, se objetiva una respuesta decremental como consecuencia del bloqueo producido por el relajante muscular en la unión neuromuscular, dando lugar a una respuesta similar a la registrada en una miastenia gravis. Así, cuando se administran estímulos repetidos a baja frecuencia, inicialmente ocurre una disminución de las vesículas liberadas en los primeros estímulos tras consumir la acetilcolina de liberación inmediata; esto da lugar a una disminución de la amplitud del potencial de placa motora que, en sujetos con trastornos de la unión neuromuscular (incluido el origen de causa farmacológico), es mayor del 5% ya que disminuye el factor de seguridad, por lo que el potencial de placa motora permanece por debajo del umbral suficiente como para asegurar la generación de un potencial de acción muscular con cada estímulo, alterándose significativamente en amplitud o área los potenciales de respuesta muscular [23].

d) Estimulador monopolar de tornillo pedicular (y electrodo subdérmico de referencia), con cátodo o electrodo activo sobre el tornillo a comprobar y ánodo sobre un músculo cercano. Primeramente se testaron las raíces a 9 mA (8-10 mA) con registro de potencial de acción muscular compuesto (CMAP) en el grupo muscular activado con el fin de confirmar que funcionaba correctamente el estimulador, comprobando previamente un adecuado nivel de relajación. Posteriormente se realizó activación del CMAP estimulando sobre cada uno de los tornillos una vez colocados en pedículo, para asegurar una adecuada localización del tornillo y ratificar la indemnidad neural. Los parámetros utilizados fueron:

- Tiempo de barrido de 50 ms/división.
- Sensibilidad de 500 μ V
 - Intensidad del estímulo 2 mA superior a la empleada con la raíz nerviosa (10 a 12 mA)
 - Frecuencia del estímulo de 3 pps
 - Duración del estímulo de 0.1 mseg

El criterio de alarma utilizado fue registrar potencial motor al estimular un tornillo pedicular.

Estos criterios se basan en los descritos en la literatura, aunque el umbral para la estimulación de tornillos es variable; la mayoría de los autores piensan que la aparición de respuesta con una intensidad menor de 10 mA indica que la cortical pedicular puede estar rota [3], aunque otros autores como [9, 21] trabajan con valores más variables comprendidos entre 7 y 11 mA como criterio para excluir la perforación de la cortical pedicular. Según Legat [8], esta técnica se puede usar para diferenciar la raíz nerviosa de bandas fibrosas durante la liberación quirúrgica de la raíz. Puede ser difícil determinar un estímulo umbral preciso a nivel del tornillo pedicular cuando existen bloqueos. Si con un primer estímulo comprendido entre 7 y 11 mA se evoca un CMAP, habrá que realizar otros estímulos de menor intensidad con el fin de conocer el valor umbral a partir del cual se obtiene respuesta y, si no obtenemos respuesta de CMAP, habrá que hacer una nueva evaluación una vez que se haya producido un deterioro de los bloqueadores neuromusculares ya que pueden ser motivo de falsos negativos; por ello, es mejor revertir el efecto de los bloqueadores neuromusculares antes de realizar la colocación y estímulo de tornillos a nivel pedicular. Otros autores [17] hablan de valores de 8 mA, siendo la obtención de respuesta de 5-8mV crítica y menor de 5 mV patológica (duración del estímulo de 0.5 ms y frecuencias de 1/s). Más allá de ello, hay quien habla de respuestas patológicas a aquellas obtenidas con valores menores a 4 mV [15]. No obstante, la Comisión de la Sociedad Española de Neurofisiología Clínica habla de valores por debajo de 10 mV [3]. Además, hay que tener en cuenta que la intensidad necesaria para despolarizar una raíz nerviosa con radiculopatía preexistente es mayor que el de una sana [2,34] y esta intensidad parece disminuir tras la descompresión [31].

SEGUIMIENTO INTRAOPERATORIO

1.- Definición de criterios de alarma

Se consideraron una serie de signos de alarma ante los cuales se avisó al cirujano. Estos criterios fueron:

- a) Criterio A: presencia de descargas neurotónicas de más de 1-2 minutos de duración.
- b) Criterio B: aparición de potencial motor tras estímulo del tornillo a 10-12 mA.

Debido a los resultados posteriormente expuestos, no se consideró la aparición de descargas tras la administración de dexametasona como un signo de alarma.

Con la EMG de barrido continuo se procede a la monitorización en tiempo real (visual y auditiva) de la musculatura inervada por fibras de las raíces nerviosas que se considera que pueden ser dañadas durante la intervención ya sea por agresión mecánica (tracción o estiramiento, compresión, frotamiento o manipulación del nervio), térmica (como es la irrigación de agua fría sobre el campo quirúrgico [2]) o metabólica. La lesión de estos nervios motores o de las raíces nerviosas monitorizadas despolariza el nervio o raíz afectada activándose una o varias unidades motoras, por lo que los axones de las unidades motoras activadas evocan o generan disparos repetitivos de alta frecuencia o trenes de potenciales que se conocen como descargas neurotónicas; estos trenes o disparos dan lugar a una contracción tónica de las unidades motoras que se accionan y se usan como signo de alarma para dar a conocer al cirujano los nervios o raíces que están siendo manipuladas con la finalidad de prevenir mayores lesiones. A diferencia de las descargas aisladas de la EMG del barrido continuo, sugieren una lesión más importante que una simple irritación [25]. Una de las primeras figuras que describieron estas descargas neurotónicas fueron Buchthal [28] y Kimura [29], que las compararon por su sonido con el ataque bombardero en picado. Las descargas neurotónicas forman parte de la actividad espontánea [26]. Su definición con respecto a la frecuencia de descarga ha sido históricamente establecida por consenso en la literatura [27,30].

Es importante distinguir [25]:

- a) Brotes breves (fracción de segundo): son frecuentes pero normalmente no son motivo de alarma y raramente indican daño neural.
- b) Trenes largos (varios minutos): a diferencia de las descargas aisladas de la EMG del barrido continuo, sugieren una lesión más importante que una simple irritación, ya que pueden indicar daño neural por lo que son motivo de alarma.

Así, los libros de texto las definen de manera similar en materia de descarga aunque conceptualmente quedan definidas de forma variable:

- a) Según Brown y colaboradores [4] se trata de descargas características de una unidad motora, que se relacionan con la irritación mecánica, térmica o metabólica de la membrana nerviosa, y se presentan como brotes rápidos e irregulares de varios milisegundos de duración o trenes prolongados que duran hasta un minuto, pudiendo contener cada descarga de 1 a 10 potenciales de unidad motora que descargan a frecuencias de 50 a 200 Hz.
- b) V Delevis y JL Shils [5] afirman que la aparición de brotes breves (fracción de segundo) son frecuentes pero normalmente no son motivo de alarma y raramente

indican daño neural, mientras que los trenes largos (varios minutos) son motivo de alarma ya que pueden provocar daño neural; no obstante, su ausencia (como sería el caso de una sección nerviosa aguda) no excluiría lesión.

c) JA Strommen y BA Crum las definen como descargas rápidas e irregulares de varios segundos de duración (más de un minuto), cada una de las cuales está constituida por 1 a 10 PUMs y cuya frecuencia varía de 30 a 200 Hz [26].

d) La American Association of Electrodiagnosis Medicine (AAEM) [27] define la descarga neurotónica como un potencial de acción motor repetitivo registrado a través de electrodos intramusculares durante la monitorización intraoperatoria que derivan de la irritación o lesión de las fibras nerviosas que abastecen al músculo sobre el cual se registran. Las descargas neurotónicas se deben distinguir de los PUM semirrítmicos voluntarios, que habitualmente ocurren en múltiples músculos y de manera bilateral en condiciones de bajos niveles de anestesia.

e) Otros autores hablan de brotes repetidos en vez de trenes [20].

Resulta importante diferenciar las descargas neurotónicas de otros registros que puedan dar lugar a confusión con ellas, como son [26]:

a) Artefacto de línea (50-60 Hz).

b) Artefactos de movimiento. Generalmente se reconocen como ondas triangulares irregulares y tienen un sonido característico de explosión.

c) Interferencias de equipo: respirador, bisturí eléctrico, disector ultrasónico (cavitron), calentadores o humidificadores. Entre otros, la electrocauterización causa artefactos de alta frecuencia.

d) Disparos de potenciales de unidad motora (PUMs) en pacientes con anestesia ligera y reflejos activos. Las descargas neurotónicas se deben distinguir de los PUMs semirrítmicos voluntarios, que habitualmente ocurren en múltiples músculos y de manera bilateral en condiciones de bajos niveles de anestesia [26].

e) Actividad espontánea como son las fibrilaciones, las ondas positivas o las descargas repetitivas complejas. Este tipo de descargas no se asocian a la cirugía, sino a la lesión, y suelen cesar cuando se produce descompresión de la raíz.

g) Potenciales de placa.

h) Corticoides.

La existencia de cualquier incidencia durante el tiempo de quedó registrada y, en caso de signos de alarma se informó al cirujano de ello.

2.- Técnicas neurofisiológicas intraoperatorias usadas

La técnica estándar para evaluar la función motora durante la cirugía de raquis es la electromiografía intraoperatoria [3] que incluye:

- a) EMG de inserción (barrido libre o continuo) para estudio de la actividad miogénica espontánea con registro simultáneo en músculos con raíces expuestas a lesión que, como anteriormente citamos comprendía niveles situados entre las raíces L3 y S2. Se monitorizó de manera rigurosa el músculo dependiente de la raíz que se descomprimía y el músculo inervado por la raíz vecina en tiempo real. Se avisó al cirujano en el caso de que aparecieran criterios de alarma.
- b) Tren de cuatro para valoración de la unión neuromuscular N peroneal – músculo peroneus longus ipsilateral. La estimulación debía de ser supramáxima con el fin de asegurar la activación de todos los axones del nervio periférico ya que cuando el estímulo es máximo la respuesta muscular dependerá no sólo del estado de la transmisión neuromuscular sino también del número de axones que han podido activarse.
- c) Estimulación de tornillos con registro en musculatura dependiente de raíces expuestas. Esta maniobra se trata de una técnica estática y dependiente del estímulo, que evalúa la integridad de las estructuras nerviosas; consiste en proporcionar un estímulo eléctrico desde la raíz nerviosa a través del tornillo pedicular y recoger la respuesta en el miotomo correspondiente a esa raíz. Hay que tener en cuenta que puede aparecer respuesta en la raíz L5 al estimular el tornillo S1 si éste es largo, probablemente porque este esté en contacto con la raíz cuando desciende.

3.- Periodos de la monitorización intraoperatoria

Se ha de tener en cuenta que la monitorización intraoperatoria precisa de diferentes criterios de interpretación a la EMG convencional, ya que en ésta última se toman decisiones en base a criterios de normalidad o anormalidad en función de valores poblacionales, pero en quirófano se parte de unos valores iniciales tomados sobre el mismo paciente partiendo de que se trata de un sujeto anestesiado en el que las respuestas son diferentes; además de ello, durante la intervención, pasan a tomar interés parámetros menos importantes previamente tales como la amplitud del potencial motor para evaluar un posible daño axonal durante el proceso. Desde el punto de vista neurofisiológico, la intervención consta de varios periodos:

a) Periodo de “prebasaline” Los pasos iniciales de la vigilancia operatoria es lo que los americanos denominan periodo de "prebaseline" [25] que es la etapa que comprende desde la llegada del paciente al quirófano hasta la exposición a riesgo del tejido neural; en esta fase se adquieren los datos neurofisiológicos iniciales, ajustando el material sobre el paciente si fuera necesario para garantizar la máxima exactitud. Esta fase también permite un reajuste de la anestesia, con eliminación de los agentes utilizados para la inducción, equilibrio de las constantes y recuperación de un tono muscular apropiado para una adecuada valoración de la integridad de las estructuras nerviosas. De ahí que sea el momento en el que más variaciones existan en el paciente desde el punto de vista de la monitorización intraoperatoria aunque se trate de un periodo de bajo riesgo. La única excepción posible es la colocación del paciente anestesiado ya que está inconsciente (sin percepción de dolor) y la musculatura está totalmente relajada. Así, el posicionamiento puede conllevar un riesgo significativo para la columna vertebral inestable por lo que se ha de realizar un seguimiento EMG continuo inmediatamente después de la colocación. El siguiente paso en el proceso de seguimiento es el establecimiento del patrón de la "línea de base" de los datos neurofisiológicos antes de la exposición de las estructuras neurales. Los datos recogidos en este punto son fundamentales, ya que constituyen el punto de comparación respecto a los cambios posteriores que puedan suponer un criterio de alarma. Así, en la sala de operaciones, las decisiones en cuanto a la presencia o ausencia de nuevas lesiones neuronales se basan en los cambios respecto a los valores previos de referencia del mismo paciente.

b) Periodo de riesgo. Se trata de la fase en el que una lesión es más probable e incluye la fase de colocación de tornillos pediculares, descompresión radicular y, en menor medida, la colocación de barras. Si existe un criterio de alarma, se informará al cirujano para adoptar las medidas adecuadas. La EMG de barrido continuo ofrece importantes ventajas. Una de las ventajas de esta técnica es su capacidad para proporcionar información instantánea para el cirujano ya que no sólo da información visual sino también auditiva que informa tanto al electromiografista como al cirujano de la existencia de riesgo de daño neural, resultando eficaz en intervenciones que en las que el nervio presente una irritación mecánica repetitiva. Así, el EMG normal durante la cirugía es la inactividad, el silencio eléctrico, por lo que la presencia de actividad EMG puede reflejar la irritación del tejido nervioso y se debería informar al cirujano; su intensidad y duración de la actividad EMG refleja el grado de irritación nerviosa, no obstante, hay otras causas que pueden dar lugar a una activación o aumento del tono

muscular, como son: el movimiento voluntario en la presencia de anestésico, la irritación osmótica (por ejemplo, el riego con líquido hipotónico), irritación por temperatura (por ejemplo, el riego con líquido frío o caliente), o enfermedades neuromusculares preexistentes con actividad espontánea anormal (denervación en actividad o miopatía). Por lo que el significado de cualquier episodio individual de actividad EMG debe interpretarse en el contexto de la actividad quirúrgica realizada. Así, primeramente se testaron las raíces a 9 mA (8-10 mA) con registro de potencial de acción muscular compuesto (CMAP) en el grupo muscular activado con el fin de confirmar que funcionaba correctamente el estimulador, comprobando previamente un adecuado nivel de relajación. Posteriormente se realizó activación del CMAP estimulando sobre cada uno de los tornillos una vez colocados en pedículo, para asegurar una adecuada localización del tornillo, de tal manera que:

A) después de la inserción de los tornillos transpediculares, la integridad de la corteza pedicular se comprobó con la estimulación eléctrica de la cabeza del tornillo de unos 11 mA (10-12 mA), y la ausencia de registro de CMAP en el grupo muscular activado. La resistencia eléctrica de hueso es mayor que la de los tejidos circundantes; como consecuencia, un tornillo pedicular implantado que está completamente rodeado por el hueso, no da lugar a activación nerviosa en estos rangos de amperaje. No obstante, cuando se estimula el tornillo situado en pedículo y no se obtiene CMAP, es recomendable aumentar la intensidad del estímulo con el fin de registrar un potencial para corroborar la ausencia de lesión radicular.

B) al contrario que un pedículo intacto (que bloquea el paso de este estímulo al nervio y previene la despolarización), una perforación de la pared medial del pedículo proporciona una vía de baja resistencia entre el tornillo y el tejido nervioso adyacente, permitiendo el paso de la corriente aplicada (de 7 a 10 mA) desde el tornillo al nervio, por lo que el estímulo umbral para obtener una respuesta disminuye significativamente y provoca una despolarización del nervio y, finalmente, una contracción muscular del grupo muscular inervado por la raíz del nervio espinal, que puede ser registrado como un CMAP; así, esta situación plantea un signo de alarma por malposición del tornillo, lo que supone un riesgo potencial para provocar lesión de las estructuras nerviosas [9]. Por lo tanto, ante violación de la corteza medial del pedículo, la estimulación eléctrica del tornillo pedicular a intensidades de estímulo por debajo 7mA era suficiente para evocar CMAP del grupo muscular inervado por la raíz del nervio espinal, lo que provocó una alerta de cirugía, modificándose la posición de los tornillos, verificándose a

su vez la nueva localización mediante radiografía y una nueva reevaluación neurofisiológica en la que se confirmaba el silencio eléctrico.

Esta técnica resulta de gran utilidad para la detección de lesiones radicales que no son detectadas visualmente o con la palpación. Por lo tanto, la estimulación eléctrica de los tornillos al ser colocados, proporciona la confirmación de que el tornillo se ha colocado dentro del hueso solo y no ha violado el pedículo.

Es importante saber que, cuando el cirujano procedió a la recolocación de algún tornillo se volvieron a testar todas las raíces.

c) Periodo de finalización. Incluye las fases de administración de corticoides intratecales y cierre del campo quirúrgico sin que existan criterios de alarma.

DEFINICIONES ESTADÍSTICAS

La exactitud de la monitorización intraoperatoria para detectar lesión radicular, fue evaluada en base a las siguientes definiciones:

a) Verdaderos positivos (VP): pacientes en los que, presentando criterios de alarma y llevando a cabo la modificación del tornillo, no se encontraron nuevas lesiones radicales en el estudio postquirúrgico.

b) Falsos positivos: pacientes que presentaban criterios de alarma y en los que no se realizó modificación del tornillo, no encontrándose nuevas lesiones radicales en el estudio postquirúrgico a pesar de ello.

c) Verdaderos negativos: pacientes sin criterios de alarma intraoperatorios ni nuevas lesiones radicales posteriores.

d) Falsos negativos: pacientes que no presentaron criterios de alarma durante la intervención o la presentaron procediendo a la modificación del tornillo, apareciendo a pesar de ello nuevas lesiones radicales.

RESULTADOS

Se monitorizó un total de 60 pacientes (30 hombres y 30 mujeres), con una edad media de 48.4 años (rango comprendido entre los 26-84 años), y una ratio hombre/mujer de 1/1.

ESTUDIO PREOPERATORIO

Desde el punto de vista quirúrgico, se realizó un diagnóstico que comprendió: estenosis de canal en 30 pacientes (50%), estenosis de canal y escoliosis degenerativa en 1 paciente (1.66%), discopatía en 19 pacientes (31.66%), discopatía e inestabilidad de columna en 3 pacientes (5%), inestabilidad de columna en 1 paciente (1.7 %), espondilolistesis en 4 pacientes (6.7 %) y fallo de artrodesis prequirúrgica en 2 pacientes (3.33%).

Diagnóstico quirúrgico	Nº Pacientes	% pacientes
Estenosis de canal	30	50%
Estenosis de canal + escoliosis degenerativa	1	1.66 %
Discopatía	19	31.66 %
Discopatía + inestabilidad de columna	3	5%
Inestabilidad de columna	1	1.7 %
Espondilolistesis	4	6.7%
Fallo artrodesis	2	3.33%

En el estudio EMG prequirúrgico se observaron los siguientes hallazgos: 8 de los pacientes (13.33%) presentaron un estudio sin hallazgos patológicos; 15 pacientes (25%) presentaban alterado un solo nivel radicular (1 paciente con radiculopatía L4 derecha, 1 paciente con radiculopatía L4 bilateral, 4 pacientes con radiculopatía L5 derecha, 5 pacientes con radiculopatía L5 izquierda y 4 pacientes con radiculopatía L5 bilateral); 29 de los pacientes (48.33%) presentaban afectación de 2 niveles radiculares (1 paciente con radiculopatía L3-L4 izquierda, 1 paciente con radiculopatía L3-L4 bilateral, 1 paciente con radiculopatía L4-L5 derecha, 4 pacientes con radiculopatía L4-L5 izquierda, 4 pacientes con radiculopatía L4-L5 bilateral, 7 pacientes con

radiculopatía L5-S1 derecha, 5 pacientes con radiculopatía L5-S1 izquierda y 6 pacientes con radiculopatía L5-S1 bilateral); y 8 pacientes (13.33%) presentaban afectación de más de dos niveles radiculares (1 pacientes con radiculopatía L3-L4-S1, 1 paciente con radiculopatía L4-L5-S1 derecha, 3 pacientes con radiculopatía L4-L5-S1 izquierda y 3 pacientes con radiculopatía L4-L5-S1 bilateral).

Nº niveles afectación radicular	0	1	2	> 2
Nº pacientes	8	15	29	8
% pacientes	13.33 %	25 %	48.33 %	13.33 %

ESTUDIO INTRAOPERATORIO

En 58 pacientes (96.66%) se llevó a cabo el abordaje quirúrgico vía posterior (PLIF), realizándose abordaje vía anterior (ALIF) únicamente en 2 de ellos (3.33%).

No se registraron descargas neurotónicas durante toda la intervención en ningún paciente (criterio A). Aparecieron signos de alarma al testar un total de 12 tornillos (criterio B) en 12 pacientes (20% de los pacientes), con recolocación o sustitución del tornillo en 10 de ellos, resumiéndose en que: 1 paciente requirió sustitución de tornillo L4 derecho por presentar signos de alarma; 1 paciente presentó signos de alarma al testar el tornillo L4 izquierdo que no se modificó; 1 paciente presentó signos de alarma al testar el tornillo L5 derecho que se sustituyó; 1 paciente presentó signos de alarma al testar el tornillo L5 izquierdo que se sustituyó; 3 pacientes presentaron signos de alarma al testar el tornillo S1 derecho, recolocándose en los 3 casos el tornillo; 5 pacientes presentaron signos de alarma al testar el tornillo S1 izquierdo, no modificándose el tornillo en 1 de ellos y se recolocó o sustituyó en 4 de ellos.

Signos alarma al colocar tornillos pediculares	L4	L5	S1
Nº niveles con sustitución tornillo	1	2	7
Nº niveles sin sustitución tornillo	1	0	1

Hubo puntuales disparos de potenciales de unidad motora (PUMs) en relación con la manipulación y descompresión de raíces en 7 pacientes (11.66%), y de forma más prolongada en 40 pacientes (66.66%) tras administrar dexametasona intratecal al finalizar el procedimiento.

ESTUDIO POSTOPERATORIO

De los 12 pacientes (recolocación de tornillos en 10 de ellos, es decir, 10 tornillos) se observó lo siguiente tras realizar el estudio eletromiográfico postquirúrgico: 1 paciente requirió sustitución del tornillo L4 derecho por presentar signos de alarma sin aparecer incidencias electromiográficas postquirúrgicas; 1 paciente presentó signos de alarma al testar el tornillo L4 izquierdo que no se modificó y en el estudio postquirúrgico no existieron cambios relacionados con una nueva lesión radicular; 1 paciente presentó signos de alarma al testar el tornillo L5 derecho que se sustituyó y no aparecieron nuevos cambios en el estudio EMG postquirúrgico; 1 paciente presentó signos de alarma al testar el tornillo L5 izquierdo que se sustituyó, apareciendo a pesar de ello una radiculopatía L5 bilateral aguda-subaguda en el estudio EMG postquirúrgico; 3 pacientes presentaron signos de alarma al testar el tornillo S1 derecho, recolocándose en los 3 casos el tornillo, y observándose en el estudio postquirúrgico 1 paciente que presentó una nueva radiculopatía L5-S1 aguda-subaguda bilateral; 5 pacientes presentaron signos de alarma al testar el tornillo S1 izquierdo, no modificándose el tornillo en 1 de ellos (no presentó cambios postquirúrgicos) y se recolocó o sustituyó en 4 de ellos 1 de los cuales presentó una nueva lesión radicular L5 izquierda aguda-subaguda. En resumen, vemos que en 12 pacientes aparecen signos de alarma al testar los tornillos: en 2 de ellos no se realiza cambio y/o recolocación y no aparece lesión nueva postquirúrgica (falsos positivos); en 10 pacientes se realiza corrección del tornillo sin aparecer cambios postquirúrgicos asociados a ese nivel de alarma en 9 pacientes y una nueva lesión a este nivel en 1 paciente (falso negativo); en 3 pacientes se mostró un total de 5 raíces en las que aparece una nueva lesión en un nivel en el que no existían signos de alarma al cierre (4 L5 y 1 S1). Si describimos la totalidad de los hallazgos tras realizar la EMG postquirúrgica descubrimos:

a) 7 pacientes (11.67 %) verdaderos positivos. Presentaron criterios de alarma, se modificó el tornillo y no apareciendo nuevas lesiones en el estudio postquirúrgico. Se presentaron a nivel L4 derecha (1 paciente), L5 derecha (1 paciente) S1 derecha (2 pacientes) y S1 izquierda (3 pacientes).

b) 2 pacientes (3.33%) falsos positivos. Presentaban criterios de alarma pero no se modificó el tornillo (L4 derecho y S1 izquierdo) y, a pesar de ello, no se objetivaron nuevas lesiones radicales.

c) 38 pacientes (63.33%) verdaderos negativos. Pacientes sin signos de alarma ni lesiones posteriores.

d) 13 pacientes (21.67 %) falsos negativos. Pacientes que, habiendo o no presentado criterios de alarma a cualquier nivel, no se apreciaban al cierre quirúrgico y, a pesar de ello, se objetivó alguna nueva lesión radicular en el estudio postoperatorio. Estos datos se resumen en: 2 pacientes con una nueva radiculopatía L4 izquierda y sin signos de alarma intraoperatorios/al cierre a este nivel, 3 pacientes con una nueva radiculopatía L5 derecha y sin signos de alarma intraoperatorios/al cierre a este nivel, 5 pacientes con una nueva radiculopatía L5 izquierda sin signos de alarma intraoperatorios/al cierre a este nivel (1 de ellos presentó signo de alarma S1 izquierda con recolocación del tornillo), 1 paciente con una nueva radiculopatía S1 derecha sin signos de alarma intraoperatorios/al cierre a este nivel, 1 paciente con una nueva radiculopatía L5 bilateral sin signos de alarma intraoperatorios/al cierre a este nivel (este paciente presentó signo de alarma L5 izquierda con modificación del tornillo) y 1 paciente con una nueva radiculopatía L5-S1 bilateral sin signos de alarma intraoperatorios/al cierre a este nivel (este paciente presentó signo de alarma S1 derecha con modificación del tornillo).

Nº pacientes con signos alarma / nº pacientes con lesión postquirúrgica	L4	L5	S1
Sustitución tornillo	1/0	2/1	7/1
No sustitución tornillo	1/0	0/0	1/0

Nº signos alarma / nº lesiones postquirúrgicas en estos pacientes	L4	L5	S1
Nº signos alarma / nº lesiones postqx	2/0	2/5	8/2
Nº pacientes signos alarma / nº pacientes lesiones postqx	2/0	2/3	8/1

Incluye: 1 paciente en el que se realizó recolocación de tornillo L5 izquierdo y presentó 2 lesiones nuevas (L5 bilateral), 1 paciente que presentó signo de alarma en la raíz S1 derecha y 4 lesiones nuevas (L5 y S1 bilateral) y 1 paciente sin signos de alarma (radiculopatía L5 izquierda).

Nº signos alarma / nº lesiones postquirúrgicas	L4	L5	S1
Nº signos alarma / nº lesiones postqx	2/2	2/12	8/3
Nº pacientes signos alarma / nº pacientes lesiones postqx	2/2	2/10	8/2

Nº de nuevos niveles radiculares afectados sin signos de alarma al cierre	L4	L5	S1
	2	12	3

Se detectó una nueva mononeuropatía en 5 pacientes (8%), sobre todo del nervio peroneal, atribuible a compresión, sin otra lesión añadida: 2 pacientes con lesión del ciático poplíteo externo derecho, 1 paciente con lesión del ciático poplíteo externo izquierdo y 1 paciente con lesión del ciático común izquierdo.

Las nuevas radiculopatías evolucionaron satisfactoriamente.

DISCUSIÓN

El objetivo de este trabajo fue determinar si la monitorización intraoperatoria es una prueba sensible y específica a la hora de detectar las lesiones neurológicas a las que queda expuesto el paciente intervenido de columna lumbosacra. Para ello, contamos con una batería de pruebas neurofisiológicas cuyo principio subyacente es evaluar la integridad funcional de la médula espinal y las raíces nerviosas y, de esta manera, identificar las lesiones que afectan al sistema nervioso con el fin de proporcionar información sobre los cambios correlativos antes del desarrollo de lesiones neuronales irreversibles. Así, la ventaja de utilizar la monitorización intraoperatoria como método de orientación y diagnóstico intraoperatorio se ha establecido tanto para la evaluación de lesiones medulares como para las radiculopatías y neuropatías periféricas, quedando cuestionado por algunos estudios el valor de la monitorización intraoperatoria en otro tipo de cirugías como aquellas con finalidad descompresiva vascular por compromiso nervioso [38].

Un requisito importante que ayuda a disminuir el número de errores, es que sea el mismo observador el que realice una adecuada valoración pre y postoperatoria; a la vez, se han de intentar minimizar las valoraciones subjetivas. También partimos de que para obtener resultados fiables durante la monitorización intraoperatoria es necesario una correcta colocación de los electrodos, por lo que resulta fundamental llevar a cabo una valoración electromiográfica quirúrgica preoperatoria en todos los pacientes a fin de comprobar posibles errores técnicos; además, en todo momento es fundamental una adecuada comunicación con el anestesista para evitar una excesiva relajación muscular que pudiera disminuir la sensibilidad de la monitorización electromiográfica para la detección de lesión una radicular [10, 12, 13]. Es de nuestro interés tanto la información actualizada que nos dé el cirujano acerca de la manipulación que está realizando de los diferentes tejidos a fin de evaluar determinados signos como son el registro de potenciales de unidad motora espontáneos, como otros factores como son la habilidad y experiencia del traumatólogo que hacen variar la incidencia de nuevas lesiones.

Resulta fundamental llevar a cabo una valoración clínica y electromiográfica preoperatoria que abarque los niveles del sistema nervioso que van a quedar expuestos potencialmente a lesión quirúrgica con la finalidad de centrar la monitorización intraoperatoria en dichos niveles a efectos de realizar una evaluación lo más continuada posible de estas estructuras durante la cirugía y no perder información que pueda ser

relevante a la hora de tomar decisiones en el quirófano. El uso de los potenciales evocados somatosensoriales y motores forman parte de la monitorización intraoperatoria rutinaria en los que el tejido medular pueda ser lesionado durante el procedimiento quirúrgico ya que, como diferentes estudios han demostrado, la monitorización neurofisiológica de la función medular durante la cirugía de raquis ha reducido la incidencia de lesión neurológica postquirúrgica en un 50% de los pacientes [3]; no obstante, y aunque algunos autores defienden que se deben de realizar monitorización medular mediante potenciales incluso en cirugías en las que sólo se expongan las raíces lumbosacras [17, 24, 39], no existe suficiente evidencia de que se obtengan mejores resultados; por ello, podemos afirmar que resulta de elección en nuestro caso la monitorización de las raíces nerviosas por ser una técnica más sensible que los potenciales evocados somatosensoriales para valorar la función radicular [6, 19] y, dado que las estructuras radiculares son las que quedaban expuestas a lesión, resulta evidente centrar la monitorización intraoperatoria de nuestros pacientes en un estudio continuado de estas raíces con el fin de informar al cirujano de los resultados en tiempo real.

La presión actual para aumentar el control sobre el coste involucrado en la atención médica hace que nos planteemos no solo el beneficio de la monitorización intraoperatoria obtenido por el paciente, sino también el coste inmediato de ésta. Algunos de estos beneficios tienen un impacto inmediato, mientras que otros tienen beneficios a largo plazo. La mayoría de los traumatólogos están de acuerdo en que este campo de la neurofisiología esté presente en el quirófano, pues resulta de utilidad para el cirujano con el fin de conocer que se encuentra en el nivel correcto y si está produciendo lesión ya que somos capaces de registrar signos de alarma; de hecho, este tipo de la investigación ha sido responsable de muchos avances en el tratamiento médico y quirúrgico de diferentes trastornos. En cualquier caso y contestando a la pregunta acerca de los pacientes que podrían beneficiarse de la monitorización intraoperatoria es difícil de definir, aunque lo primero que nos hemos de plantear, es en qué condiciones preoperatorias se encuentra el paciente; así, por ejemplo, una lesión radicular completa no obtendría beneficio alguno. No obstante, son muy pocos los tipos de intervenciones que han sido analizadas en su relación coste-beneficio, siendo precisamente la evaluación de la colocación de los tornillos uno de los procedimientos más costo-efectivo junto a la monitorización del nervio facial en las intervenciones de oído medio en lo que a monitorización intraoperatoria se refiere, hablando de valores

que oscilan de un 2 al 10 % de complicaciones en relación a la colocación de tornillos pediculares en pacientes que no eran monitorizados [36, 37]. Estos resultados proporcionan directrices para la interpretación de los resultados de la estimulación de tornillos pediculares a la vez que refuerzan esta técnica como una forma fiable, rápida y económica para evitar lesiones neurológicas a pesar de que la TAC postoperatoria sea la prueba definitiva para determinar la exactitud de posicionamiento de los tornillos. Por lo tanto, los beneficios de la monitorización intraoperatoria guardan una estrecha relación tanto con la calidad asistencial (disminuyendo el número de lesiones potenciales) como con el impacto económico que supondrían tales lesiones, a la vez que reducen el estrés del cirujano. Así, los cirujanos que se han familiarizado con el uso de la monitorización intraoperatoria a menudo son reactivos a privar a sus pacientes de este procedimiento ya que creen dicho control a ser beneficioso para sus pacientes. Aunque, como hemos podido observar en nuestro estudio, la mayoría de los pacientes que presentan nuevas lesiones son de grado leve y evolucionan generalmente de forma satisfactoria, hemos de tener en cuenta que pueden haber complicaciones mayores que pueden alterar la calidad de vida del paciente. Las estimaciones del coste económico del déficit postoperatorio se restringe generalmente a las estimaciones económicas de la atención médica que requerirá el paciente, suponiendo a ello un coste sobreañadido por pérdida de la calidad de vida del paciente. Así, el valor de la monitorización intraoperatoria no se limita a reducir el riesgo de déficits postoperatorios, sino que además: (a) promueve la introducción de nuevas técnicas que puedan resultar beneficiosas para el paciente, para el médico y para el coste sanitario; (b) mejora el resultado de la intervención ya que ayuda al cirujano a alcanzar un objetivo terapéutico; (c) acorta el tiempo necesario para la intervención; (d) y da seguridad al cirujano. Por otro lado, podrían plantearse unos parámetros en función de diferentes estudios en base a los cuales pudiera evaluarse de forma individual el coste-beneficio que supone la monitorización intraoperatoria.

Con los datos obtenidos en nuestro estudio, se puede observar que nos encontramos ante una prueba altamente específica (93.7%) pero poco sensible (35%), resultados que se acercan a los descritos en otros estudios [32,33]. El porcentaje de nuevas lesiones que hemos encontrado en la electromiografía postoperatoria en pacientes que han sido monitorizados asciende al 21.66%; son controvertidos los resultados que hay descritos en la literatura acerca del beneficio obtenido en este tipo de procedimientos de instrumentación lumbar que comprenden la cirugía descompresiva [17] además de ser escasos los estudios que hablan únicamente de cirugía de columna

lumbosacra, aunque sí que se habla del beneficio obtenido durante ésta [22]. Algunos investigadores han concluido que los estudios publicados ofrecen suficiente evidencia para hacer recomendaciones acerca del uso obligatorio de la monitorización intraoperatoria en muchos tipos de cirugías como son los tumores supratentoriales, los tumores del tronco cerebral, los tumores intramedulares o la cola de caballo. Por lo tanto, también se trata de una técnica que ha sido de gran utilidad a la hora de identificar y preservar raíces nerviosas afectas de tejido neoplásico [35]. Estas ventajas de la monitorización intraoperatoria son difíciles de evaluar cuantitativamente pero, sin lugar a dudas, como hemos podido observar, contribuyen notablemente a reducir el riesgo de déficit neurológico postoperatorio y aumentar así la calidad de la atención médica en general a la vez que, en muchos casos, se reduce el costo de la atención médica. Los resultados obtenidos en nuestro estudio, así como en el resto de estudios descritos con anterioridad que hablan acerca de la monitorización intraoperatoria en esta cirugía, levantan una polémica acerca del beneficio real de éste y su capacidad para detectar una lesión temprana a la vez que nos hacen plantearnos cuales son los elementos con los que podríamos jugar para disminuir la incidencia de tales lesiones. Además, el hecho de que el 17.5% de los pacientes que presentaban descargas por corticoides sin signos de alarma intraoperatorios mostraran una nueva lesión, haría pensar que en realidad estamos hablando de forma errónea de un factor de confusión, aunque también hay que destacar que el porcentaje de pacientes sin criterios de alarma dentro de los que no reflejaron descargas por dexametasona fue del 20%. En cualquier caso, habría sido de interés contar con un grupo de pacientes a los que no se les hubiera administrado dexametasona intratecal a fin de conocer si nos encontrábamos frente a tal factor de confusión o si existían diferencias significativas entre ambos grupos que ofrecieran suficiente evidencia como para poder decir que tal fármaco es un factor de riesgo para el tejido neural; de igual forma y, a pesar de que no se realizó manipulación directa del tejido neural tras la administración corticoidea, hemos de considerar que el registro de los disparos de potenciales de unidad motora persistentes secundarios a ello podían ocultar una lesión posterior. Tampoco hemos de perder de vista que no se registró ningún signo de alarma durante la electromiografía de barrido libre continuo, por lo que, aunque en la literatura esté descrito que las descargas neurotónicas son un indicador sensible de irritación y/o lesión de las raíces lumbosacras [7], hemos de plantearnos dudas acerca de la efectividad y eficiencia de esta prueba diagnóstica partiendo de que la colocación de los tornillos pediculares era correcta en el TAC postquirúrgico y de que

únicamente 2 pacientes resultaron ser falsos positivos a la hora de evaluar el contacto del tornillo con la raíz. Resulta difícil conocer los motivos que hacen que el porcentaje de falsos positivos no sea menor del 3.33 % obtenido dada la resistencia eléctrica del hueso y los rangos de amperaje a los que trabajamos; no obstante, resulta lógico que la falta de unanimidad respecto al concepto de descargas neurotónicas que se ha descrito en la literatura pueda dar lugar a confusión. Además, no solo hemos de considerar que pueda existir un fallo técnico a la hora de evocar el CMAP, como son que el estimulador esté colocado en un lugar inadecuado, que no exista una colocación de electrodos en los músculos adecuados conforme a los miotomos con los que se va a trabajar o que haya excesivo bloqueo neuromuscular por fármacos, sino que también hemos de tener en cuenta que pueda existir una lesión axónica preoperatoria crónica que precise alto valor umbral a la hora de estimular ya que, hemos de tener en cuenta a la hora de realizar la estimulación de tornillos pediculares, que la intensidad necesaria para despolarizar una raíz nerviosa con radiculopatía preexistente es mayor que el de una sana [2,34] y, a pesar de que esta intensidad parece disminuir tras la descompresión [31], puede resultar una causa de que obtengamos un falso positivo; además de ello, la presencia de una lesión previa puede dar lugar a una menor expresividad de las descargas neurotónicas [2]. De ahí la importancia de realizar una valoración electromiográfica prequirúrgica para conocer tanto los niveles como el grado de lesión radicular y desechar la posibilidad que ofrecen algunos autores a la hora de hablar de respuestas patológicas a intensidades menores a 4 mV [15]. En cualquier caso, también hay que tener en cuenta que la EMG de barrido libre continuo puede permanecer en silencio ante una sección nerviosa aguda o aparecer respuesta distalmente al nivel de lesión haciendo creer que hay continuidad axonal pese a la sección completa [16], a pesar de que las descargas neurotónicas son sensibles ante la irritación o daño de los nervios motores por un traumatismo directo. Por otro lado, el porcentaje de falsos negativos que hemos obtenido (21.66%), no se aleja de los resultados descritos en la literatura (23%) [14].

CONCLUSIONES

La monitorización intraoperatoria de raíces lumbares bajas y sacras mediante EMG de barrido libre continuo y valoración de la colocación de los tornillos pediculares, resulta una prueba sensible pero poco específica. Así, podemos pensar en diferentes motivos que justifiquen la baja sensibilidad de esta prueba, partiendo de que no existan problemas técnicos (anestesias, adecuada colocación electrodos):

- No existen claros criterios definidos en cuanto al concepto de descarga neurotónica, siendo múltiples las vertientes que definen este concepto en cuanto a su morfología (heterogénea) y duración.
- En ocasiones es difícil distinguir estas descargas neurotónicas de disparos de potenciales de unidad motora.
- La EMG de barrido libre puede permanecer en silencio eléctrico ante una sección nerviosa aguda además de que la presencia de una lesión previa puede dar lugar a una menor expresividad de las descargas neurotónicas.
- Hay que valorar la posibilidad de que las descargas por corticoides no supongan un simple factor de confusión

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Beatty R et al: Continuous intraoperative electromyographic recording during spinal surgery: 1. J Neurosurg 1995; 82: 401-405
- [2] Neil R Holland et al: Intraoperative electromyography. Journal of Clinical Neurophysiology 2002; 12 (5): 444-453. 2002
- [3] Comisión de la Sociedad Española de Neurofisiología Clínica. Guía práctica para la realización de la monitorización neurofisiológica de la cirugía de columna. Rev Neurol 2004;38(9):879-85
- [4] Stromen JA, Daube JR. Electrophysiological studies in the operating room. En: WF Brown, CF Bolton, MJ Aminoff eds., Neuromuscular Function and Disease, WB Saunders Co., Philadelphia, 2002
- [5] Neurophysiology in Neurosurgery: A modern intraoperative approach. Deletis V & Shils JL eds., Academic Press, 2002
- [6] Aminoff MJ, Goodin DS, Parry GJ, Barbaro NM, Weinstein PR, Rosenblum ML : Electrophysiologic evaluation of lumbosacral radiculopathies: electromyography, late responses, and somatosensory evoked potentials. Neurology 1985; 35: 1514- 1518
- [7] Beatty RM, McGuire P, Moroney JM, Holladay FP : Continuous intraoperative electromyographic recording during spinal surgery. J Neurosurg 1995; 82: 401-405
- [8] Legatt AD, Schroeder CE, Gill B, Goodrich JT: Electrical stimulation and multichannel EMG recording for identification of functional neural tissue during cauda equine surgery. Child NervSyst 1992; 8: 185-189
- [9] Calancie B, Madsen P, Lbwohl N: Stimulus-evoked EMG monitoring during transpedicular lumbosacral spine instrumentation: initial clinical results. Spine 1994; 19: 2780-2786
- [10] Holland NR, Lukaczyk TA, Kostuik JP : A comparison of the stimulus thresholds required to evoke myogenic responses from normal and chronically compressed nerve roots: implications for intraoperative testing during transpedicular instrumentation. Spine 1998; 23: 224-227
- [11] Blair EA, Teeple E, Sutherland RM, Shilh T, Chen D: Effect of neuromuscular blockade on facial nerve monitoring:. Am J Otol 1994; 15: 161-167
- [12] Lennon RL, Hosking JR, Welna JO : Effect of partial neuromuscular blockade on intraoperative electromyography in patients undergoing resection of acoustic neurinomas. AnesthAnalg 1992; 75: 729-733
- [13] Minahan RE, Riley LH, Lukaczyk T, Cohe DB, Kostuik JP : The effect of neuromuscular blockade on pedicle screw stimulation thresholds:. Spine 2000; 25: 2526-2530

- [14] Helmut Wiedemayer, Barbara Fauser MD, Ibrahim Erol Sandalcioğlu MD, Heike Schäfer MD, Dietmar Stolke MD. The impact of neurophysiological intraoperative monitoring on surgical decisions: a critical analysis of 423 cases.. J Neurosurg 2002; 96: 255-62
- [15] Weiss DS. Spinal cord and nerve root monitoring during surgical treatment of lumbar stenosis. ClinOrthopRelat Res 2001;(384):82-100
- [16] MJ Harner SG, Daube JR, Beatty CW, Ebersold: Intraoperative monitoring of the facial nerve. Laryngoscope 1988; 98: 209-212
- [17] Sutter M, Eggspuehler A, Muller A, Dvorak J. Multimodal intraoperative monitoring: an overview and proposal of methodology based on 1,017 cases.Eur Spine J (2007) 16 (Suppl 2):S153–S161
- [18] Devlin VJ, Schwartz DM : Intraoperative neurophysiologic monitoring during spinal surgery. J Am AcadOrthop Surg. 2008 Feb; 16 (2): 61
- [19] Wilbourn AJ, Aminoff MJ . AAEM minimonograph # 32: the electrophysiologic examination in patients with radiculopathies. Muscle and nerve 1988; 11: 1099-114
- [20] Holland NR, Kostuik JP. Continuous electromyographic monitoring to detect nerve root injury during thoracolumbar scoliosis surgery.Spine 1997; 22 (21),2547-50
- [21] Calancie B, Madsen P, Lebowitz N. Stimulus-evoked EMG monitoring during transpedicular lumbosacral spine instrumentation: Initial clinical results.Spine 1994;19:2780–6
- [22] Santiago-Pérez S, Nevado-Estévez R, Aguirre-Arribas J, Pérez-Conde MC: Neurophysiological monitoring of lumbosacral spinal roots during spinal surgery: continuous intraoperative electromyography (EMG). ElectromyogrClinNeurophysiol. 2007 Nov-Dec; 47 (7-8): 361
- [23] Parker AL, Anubhay G, Amin BS, Harrison-Barber BS, McGrit MJ, Sciubba DM, Wolinsky JP, Bydon A, Gokaslan ZL, Witham TF. Ability of electromyographic monitoring to determine the presence of malpositioned pedicle screws in the lumbosacral spine: analysis of 2450 consecutive placed screws. J Neurosurg Spine 2011;15(2):130-5
- [24] Skinner SA, Nagib M, Bergman TA, Maxwell RE, Msangi G: The initial use of free-run electromyography to detect early motor injury during resection of intradural spinal cord lesions.Neurosurgery 2005. April; 56 (2 Suppl): 299-314; discussion 299-314
- [25] Robert E, Minahan MD: Intraoperative monitoring. The neurologist 2002 Jul; 8 (4): 209-223
- [26] Paul E Barkhaus MD, SanjeevD.Nandedkar PhD. Letter to the Editor. Muscle and Nerve. Published online 22 August 2006 in Wiley InterScience

- [27] AAEM Nomenclature Committee. AAEM glossary of terms in electrodiagnostic medicine. *Muscle Nerve* 2001(Suppl 10):S19]
- [28] An introduction to electromyography. Buchthal F. Copenhagen: Gyldendal; 1957. p 33
- [29] Kimura J. Electrodiagnosis in diseases of nerve and muscle. New York: Oxford; 2001. p 343–344
- [30] International Federation of Societies for Electroencephalography and Clinical Neurophysiology. Recommendations for the practice of clinical neurophysiology. Amsterdam: Elsevier;1983. p 144
- [31] Uribe JS, Vale FL, Dakwar E. Electrophysiological monitoring and its anatomical implications in minimally invasive spine surgery. *Spine* 2010;26S:S368-74
- [32] Gunnarsson T, Krassioukov AV, Sarjeant R, et al. 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
- [33] Kelleher MO, Tan G, Sarjeant R, et al. Predictive value of intraoperativeneurophysiological monitoring during cervical spine surgery: aprospectiveanalysis of 1055 consecutive patients. *J Neurosurg Spine* 2008;8:215
- [34] Weiss DS. Spinal cord and nerve root monitoring during surgical treatment of lumbar stenosis. *ClinOrthopRelat Res* 2001;(384):82-100
- [35] Guo L, Quiñones-Hinojosa A, Yingling CD, Weinstein PR. Continuous EMG recordings and intraoperative electrical stimulation for identification and protection of cervical nerve roots during foraminal tumor surgery. *J Spinal Disord Tech.*2006 Feb;19(1):37-42
- [36] Toleikis JR. Neurophysiological monitoring during pedicle screw placement. InDeletis V, Shils JL, Neurophysiology in Neurosurgery. Amsterdam. Elsevier; 2002: 231-264
- [37] Toleikis JR, Skelly JP, Carlvin AO, et al. The usefulness of electrical stimulation for assessing pedicle screw placements. *J SpinalDisord.*2000; 13:283-289
- [38] Sala F, Krzan MJ, Deletis V. Intraoperative neurophysiological monitoring in pediatric neurosurgery: why, when, who? *Childs Nerv. Syst.* 2002; 18: 264-284
- [39] Welch WC, Rose RD, Balzer JR, et al. Evaluation with evoked and spontaneous electromyography during lumbar instrumentation: A prospective study. *J Neurosurg* 1997; 87:397–402