

11 TELENEUROFISIOLOGIA INTRAOPERATORIA DELL'ADULTO E DEL BAMBINO

Paola Lanteri (a), Rocco Quatralo (b), Elena Bignami (c), Giuseppe Stipa (d)

(a) *Neurofisiopatologia, Fondazione IRCCS Istituto Neurologico Carlo Besta, Milano*

(b) *Dipartimento di Scienze neurologiche, Ospedale dell'Angelo Mestre, Venezia*

(c) *Dipartimento di Medicina e Chirurgia, Università di Parma*

(d) *Dipartimento di Neuroscienze, Azienda Ospedaliera S. Maria di Terni*

La neurofisiologia intraoperatoria comprende l'insieme delle modalità neurofisiologiche di monitoraggio e mappaggio finalizzate al controllo in tempo reale dell'integrità delle strutture nervose, centrali e periferiche, potenzialmente coinvolte durante l'atto chirurgico o alla identificazione intraoperatoria di aree eloquenti. Il fine ultimo che giustifica, sia nell'adulto che nel bambino, l'utilizzo di sofisticati sistemi di neurofisiologia intraoperatoria consiste nel risparmiare il più possibile le strutture nervose durante l'atto chirurgico stesso.

In questo capitolo si esaminano i principi fondamentali per il corretto utilizzo della teleneurofisiologia intraoperatoria, iniziando con un paragrafo dedicato ai principi generali del monitoraggio intraoperatorio (*Intraoperative Monitoring*, IOM) in telemedicina, validi per sia per l'adulto che per il bambino, e poi con un secondo paragrafo dedicato agli accorgimenti necessari per i bambini.

11.1 Principi generali di IOM in telemedicina

Le metodiche di IOM possono essere suddivise in tecniche di *monitoring* che testano in continuo le funzionalità di uno o più sistemi e quelle di *testing/mapping* in grado di localizzare strutture nervose in aree eloquenti (1). I dispositivi digitali, dedicati alla raccolta e all'elaborazione dei segnali bioelettrici periferici e centrali, alla pari delle apparecchiature comunemente utilizzate per gli studi routinari di elettromiografia (EMG), elettroencefalografia (ENG), *Evoked Potentials* (EP), elettroencefalografia (EEG), utilizzano computer in rete che possono essere messi in comunicazione con il responsabile del monitoraggio, il quale può agire anche da postazione remota (2-4). A tale proposito, dalle "Raccomandazioni del gruppo di lavoro intersocietario SINC-SINCh, 2010-2015" (5), si richiama la seguente frase che il Gruppo di Consensus Nazionale assume integralmente a riferimento:

"Il responsabile del monitoraggio intra-operatorio è il neurofisiologo clinico o altra figura medica con adeguata competenza (Neurofisiologo del Monitoraggio Intraoperatorio: N-IOM). Le tecniche di neurofisiologia intraoperatoria vengono eseguite dal tecnico di neurofisiopatologia (TNFP) sotto supervisione del responsabile del monitoraggio."

Lo N-IOM fornisce la supervisione dell'intera procedura che comprende:

- la valutazione dei fattori del paziente per la pianificazione IOM, la quale va condivisa con il neurochirurgo, con il TNFP e con l'anestesista;
- lo IOM, dalla fase iniziale dell'intervento per l'acquisizione dei segnali di base fino alla conclusione dell'atto chirurgico;
- il follow-up postoperatorio;
- la gestione del personale che gestisce la strumentazione a supporto di tutte le suddette attività.

Il *setting* anestesilogico può modificare sostanzialmente i segnali neurofisiologici per cui deve instaurarsi un dialogo continuo di aggiornamento in tempo reale su particolari necessità anestesilogiche soprattutto in fasce di età estreme (paziente pediatrico e anziano) o interventi complessi.

Allo stato attuale delle conoscenze, la tecnica migliore per garantire la minore interferenza con le attività di neurofisiologia intraoperatoria è l'anestesia totalmente endovenosa (*Total Intra-Venous Anesthesia*, TIVA) realizzata con l'infusione basata su di un target plasmatico (*Target Controlled Infusion*, TCI) di basse dosi di propofol (come ipnotico) e remifentanil o ketamina (come analgesico). Evitando, se possibile, la somministrazione di curari che producono un blocco neuro-muscolare (se non nelle fasi di induzione dell'anestesia generale per eseguire l'intubazione oro-tracheale) (6).

L'erogazione dei servizi IOM da parte dello N-IOM può essere attualmente fornita:

- di persona in sala operatoria;
- tramite un modello in telemedicina (tele-IOM) con servizi forniti dall'esterno della sala operatoria e con il TNFP in presenza;
- una combinazione di entrambi i modelli di cui sopra a seconda del tipo di intervento, delle esigenze del paziente e dell'autonomia professionale in quest'ambito del TNFP (3).

Il responsabile del monitoraggio e il TNFP sono integrati con il personale di sala: anestesisti, infermieri di sala, radiologi e chirurghi.

Lo IOM viene suddiviso in cinque fasi:

1. *Montaggio*: vengono inseriti gli elettrodi di registrazione e di stimolazione, in base al tipo d'intervento chirurgico.
2. *Fase preparatoria*: è il momento durante il quale i chirurghi preparano il campo operatorio; durante questa fase vengono acquisiti i valori neurofisiologici basali che dovranno rimanere stazionari nella fase successiva.
3. *Fase operatoria*: è il momento oggetto dell'azione operatoria finalizzata alla soluzione chirurgica dell'intervento; il responsabile del monitoraggio e il TNFP vigilano sui valori bioelettrici registrati e comunicano in tempo reale ai chirurghi e al team di sala eventuali variazioni.
4. *Chiusura della ferita chirurgica*.
5. *Fase finale*: rimozione degli elettrodi registranti e stimolanti.

Le metodiche e tecniche utilizzabili anche a distanza in teleneurofisiologia sono le seguenti:

a. Elettroencefalografia (EEG)

In corso di monitoraggio intraoperatorio può essere monitorizzata l'attività elettroencefalografica con un montaggio ridotto a poche derivazioni, in tutti i tipi di interventi, dai sovratentoriali, sottotentoriali, spinali e del sistema nervoso periferico.

Il suo utilizzo è necessario sia per avere un *feedback* sul livello anestesilogico che può variare in corso d'intervento, sia per rilevare l'insorgenza di eventuali crisi epilettiche.

b. Elettrocorticogramma (ECoG)

L'ECoG è reso possibile grazie all'uso di elettrodi registranti che possono essere di argento, di platino o di acciaio inossidabile, inseriti su striscie ("strip") o griglie, flessibili, di silicone e posizionate direttamente sulla corteccia cerebrale. Il segnale bioelettrico corticale così ottenuto non subisce l'attenuazione causata dallo scalpo e dalle ossa del cranio.

L'utilizzo dell'ECoG è particolarmente indicato nella chirurgia dell'epilessia, per meglio individuare le zone epilettogene da asportare, e in generale nel monitoraggio intraoperatorio nella chirurgia sovratentoriale, al fine di individuare crisi epilettiche

derivanti dalla stimolazione elettrica corticale e/o da altre manovre chirurgiche a paziente sedato o sveglio (*awake surgery*).

c. *Elettromiografia (Free-Run EMG)*

Per lo studio della Free-Run EMG si utilizzano i medesimi elettrodi ad ago, bipolari concentrici e monopolari, utilizzati nella routine elettromiografica ambulatoriale. Compressioni, manipolazioni o lesioni da stiramento dei nervi periferici inducono scariche neurotoniche che devono essere interpretate in “real time”. In corso d'intervento neurochirurgico la comparsa di burst può assumere valore localizzatorio, quindi da ricondurre all'azione del neurochirurgo che deve essere allertato, ma anche da semplici manovre chirurgiche come, per esempio, dall'irrigazione del campo operatorio con soluzione fisiologica.

d. *Elettroencefalografia (ENG)*

Lo stimolo elettrico, bipolare o monopolare, erogato su un segmento di nervo periferico esposto chirurgicamente, provoca una depolarizzazione con conseguente comparsa del potenziale composto muscolare a valle. Il monitoraggio consente di avere un continuo riscontro della vitalità dei nervi periferici.

e. *SEP-VEP-BAEP*

I SEP (*Somatosensory Evoked Potentials*), i VEP (*Visually Evoked Potentials*) e i BAEP (*Brainstem Auditory Evoked Potentials*), al pari della routine ambulatoriale, sono potenziali ottenuti dalla stimolazione delle rispettive vie centrali sensoriali somatosensitive (SEP), visive (VEP) e acustiche (BAEP).

f. *Motor Evoked Potentials (MEP)*

I MEP usati in sala operatoria, al contrario dei MEP da stimolo magnetico utilizzati nella routine ambulatoriale, sono potenziali ottenuti dalla stimolazione elettrica diretta o transcranica anodica della corteccia motoria, o catodica delle vie motorie sottocorticali, con registrazione a livello muscolare (m-MEP) o da un elettrodo epidurale (*D-wave*).

Le metodiche utilizzate sono due: a) registrazione dei m-MEP utilizzando un treno di stimoli (tecnica multi-pulse), da elettrodi posti a livello transcranico o direttamente sulla corteccia; b) registrazione della *D-wave* direttamente dallo spazio epidurale elicitata da un singolo stimolo (tecnica *single-pulse*).

g. *Blink reflex*

In anestesia generale è possibile registrare la component R1 del *blink reflex* da un treno di 3-4 stimoli elettrici con ISI di 2 ms applicati a livello del nervo sovraorbitario.

La registrazione si può effettuare sia con elettrodi di superficie che con elettrodi ad ago, si ottiene una risposta che ha latenza e ampiezza molto variabile.

h. *Riflesso sacrale*

Con lo stesso stimolo erogato per evocare i SEP sacrali si registra una risposta dal m. bulbo cavernoso o dal m. sfintere striato dell'ano, sfruttando il fatto che l'attività tonica del muscolo è ridotta dall'anestesia. Questo spiega anche le differenze di latenza e di morfologia fra la risposta ottenuta in anestesia (con numero ridotto di acquisizioni) e la risposta ottenuta a soggetto sveglio (in singola acquisizione).

Questa fornisce informazioni sull'integrità del circuito riflesso sacrale e parzialmente sui sistemi interneuronali sacrali di integrazione. Con un modesto numero di acquisizioni (20-50) si ottiene una risposta stabile a 25-35 ms di latenza, ampia da 5 a 15 μ V e ripetibile.

11.1.1 Tecniche di mappaggio

Le tecniche di monitoraggio neurofisiologia intraoperatoria vengono integrate da tecniche di mappaggio che utilizzano la stimolazione elettrica erogata mediante stimolatori monopolari o bipolari, direttamente sulle strutture nervose, per l'identificazione di zone eloquenti come le aree del linguaggio (in *awake*), le aree motorie corticali e il fascio cortico-spinale e cortico-bulbare sottocorticale, la distribuzione dei nuclei dei nervi cranici misti e del decorso dei nervi cranici misti a livello del pavimento del IV ventricolo (identificazione della *safe entry zone*) e in generale nella fossa cranica posteriore, mappaggio dei cordoni posteriori a livello spinale, stimolazione diretta delle radici e dei nervi cranici e spinali.

Nella fase di mappaggio è raccomandata la presenza diretta dello N-IOM per la necessità di una interpretazione in tempo reale e comunicazione istantanea del risultato del mappaggio che coadiuverà le decisioni del chirurgo sull'approccio chirurgico nelle varie fasi dell'intervento.

11.1.2 Dotazione tecnologica minima raccomandata per tele-IOM

Il punto di partenza per la corretta scelta, in ambito chirurgico, della dotazione tecnologica per l'esecuzione del tele-IOM consiste nell'analisi del livello organizzativo in cui si colloca la prestazione, o la sequenza di prestazioni, connesse con il tele-IOM stesso.

Le prestazioni di cui sopra possono essere collocate organizzativamente come segue:

- Intra-presidio: modalità sincrona.
- Intra-aziendale: modalità sincrona o asincrona.
- Inter-aziendale: modalità sincrona o asincrona.

In Tabella 11.1 viene schematizzata la dotazione tecnologica minima raccomandata dal Gruppo di Consensus Nazionale per eseguire in sicurezza ed efficacia il tele-IOM.

Tabella 11.1. Schema della dotazione tecnologica minima raccomandata per la tele-IOM sia nell'adulto che nel bambino, ripartita in base alle differenti fasi di esecuzione

| Fasi di esecuzione tele-IOM | | Dotazione tecnologica minima raccomandata per tele-IOM |
|-----------------------------|--------------|---|
| Montaggio | | Collegamento visivo ambientale e vocale |
| Fase preparatoria | | Possibilità di aver accesso in tempo reale ai dati neurofisiologici basali da monitorizzare |
| Fase operatoria | Monitoraggio | Possibilità di aver accesso in tempo reale non solo ai dati neurofisiologici da monitorizzare e al video del campo operatorio proveniente dal microscopio ottico, ma anche di avere un'immagine della situazione ambientale nella quale si svolge l'intervento chirurgico. Pertanto è raccomandabile acquisire anche una panoramica della sala e della postazione dell'anestesista, con particolare riguardo al monitor dell'apparecchiatura anestesiologicala, per una rapida valutazione dei parametri vitali e del <i>setting</i> anestesiologicalo, al fine di differenziare tra veri positivi e falsi positivi nel caso di variazioni dei segnali bioelettrici in corso di monitoraggio. |
| | Mappaggio | Raccomandata la presenza dello N-IOM in sala operatoria |
| Chiusura | | Possibilità di aver accesso in tempo reale ai dati neurofisiologici da monitorizzare |
| Fase finale | | Possibilità di aver accesso in tempo reale ai dati neurofisiologici da monitorizzare |

11.1.3 Monitoraggio intraoperatorio in telemedicina (tele-IOM)

È responsabilità dello N-IOM decidere se e quali delle 5 fasi dello IOM seguire in tele-IOM o in presenza: N-IOM può condurre interamente in remoto la propria opera e può decidere di recarsi fisicamente nella sala operatoria durante la fase n. 3 in casi selezionati, qualora se ne presenti la necessità (3). È sempre possibile l'utilizzo della *second-opinion*, finalizzata alla discussione e rivalutazione di casi già conclusi in cui vi siano state difficoltà interpretative.

In Tabella 11.2 viene schematizzata la possibilità di esecuzione del tele-IOM nel paziente adulto. Nelle note della stessa tabella si trovano alcune raccomandazioni.

Tabella 11.2. Possibilità di esecuzione del tele-IOM per paziente adulto, a secondo delle varie fasi di esecuzione, suddivise per modalità organizzative. Viene indicata anche quando sussiste la necessità di supervisione

| Fasi di esecuzione tele-IOM | Intra-presidio (tele-IOM/supervisione**) | Intra-aziendale (tele-IOM/supervisione**) | Inter-aziendale (supervisione**) |
|-----------------------------|--|---|-----------------------------------|
| Montaggio (1) | sì | sì | sì |
| Fase preparatoria (1) | sì | sì | sì |
| Fase operatoria | Monitoraggio | sì (2) | no/sì (2) con supervisione (3) |
| | Mappaggio | no/sì con supervisione (3) | no/sì con supervisione (3) |
| Chiusura | sì | sì | sì |
| Fase finale | sì | sì | sì |

(1) Raccomandazione del Gruppo di Consensus: l'eventuale teleassistenza TNFP è possibile in base al grado di autonomia che il TNFP di sala detiene, considerando in ciascun caso specifico sia la modalità di esecuzione dello IOM sia la sua complessità.

(2) Raccomandazione del Gruppo di Consensus: si tenga sempre presente che la possibilità di esecuzione del telemonitoraggio in fase operatoria dipende dalla complessità dell'intervento e dalle caratteristiche del paziente e la scelta è una responsabilità precisa dello specialista.

(3) Il tele-IOM può avvalersi di una supervisione. Un secondo "N-IOM esperto", quando ubicato in struttura ospedaliera diversa da quella ove si svolge lo IOM e quindi non raggiungibile in tempo reale, o nei casi di mappaggio intraoperatorio, affianca in remoto lo N-IOM "locale". In questo caso la responsabilità dello IOM viene condivisa tra lo N-IOM locale e il supervisore, il quale controfirmerà digitalmente il referto del monitoraggio o anche con firma autografa in modalità differita, ove vi siano casi di necessità.

11.1.4 Situazioni cliniche di riferimento per la prestazione o la sequenza di prestazioni in telemedicina

Per semplicità di seguito si fa riferimento alla ormai consolidata esperienza di neurofisiologia intraoperatoria in ambito neurochirurgico, condivisa in Italia con la Società Italiana di Neurochirurgia SINCh (Raccomandazioni del gruppo di lavoro intersocietario SINC-SINCh, 2010-2015) (5) come:

- Chirurgia sovratentoriale.
- Chirurgia sottotentoriale.
- Chirurgia spinale: cervicale, dorsale, lombare, cono, cauda.
- Chirurgia del sistema nervoso periferico (SNP).

In realtà gli ambiti della neurofisiologia intraoperatoria sono ben più vasti, come ad esempio la chirurgia ortopedica, vascolare, otorino, collo e tiroide-paratiroide, pavimento pelvico e potenzialmente espandibili.

La neurofisiologia intraoperatoria è applicabile, con i principi di monitoraggio e mappaggio precedentemente descritti, in tutte quelle situazioni in cui serva garantire l'integrità funzionale delle strutture nervose centrali e periferiche coinvolte direttamente o indirettamente dalla sede dell'intervento. Le varie metodiche di base precedentemente descritte vengono diversamente combinate in base al tipo e sede di intervento; la responsabilità della gestione dello IOM è sempre dello N-IOM.

11.1.4.1 Chirurgia sovratentoriale

Le tecniche neurofisiologiche in telemedicina possono essere utilizzate nella chirurgia sovratentoriale di lesioni o di malformazioni occupanti spazio all'interno o adiacenti alle aree e delle vie eloquenti corticali e sottocorticali. I principali esempi sono rappresentati in Tabella 11.3.

Tabella 11.3. Elenco di patologie sovratentoriali con distinzioni di approccio e protocolli consigliati, secondo le "Raccomandazioni del gruppo di lavoro intersocietario SINC-SINCh, 2010-2015" (5)

| Localizzazione | Patologia | Monitoraggio motorio (m-MEP) | Mappaggio sensori-motorio e cognitivo (m-MEP – PES) |
|--|--|------------------------------|---|
| Area motoria primaria, fascio cortico-spinale sovratentoriale, area sensitiva primaria, aree eloquenti cognitive | Gliomi a basso grado | Procedura standard | Procedura standard |
| | Gliomi ad alto grado potenzialmente asportabili radicalmente senza gravi deficit preoperatori (forza >4) | Procedura standard | Procedura standard |
| | Neoplasie extracerebrali: meningiomi | Opzionale | Opzionale |
| | Neoplasie extracerebrali: metastasi | Opzionale | Opzionale |
| | Malformazioni vascolari (cavernomi, piccole MAV) | Procedura standard | Procedura standard |
| | PNET | Procedura standard | Procedura standard |
| Insula | Gliomi a basso grado | Procedura standard | Opzionale |
| | Gliomi ad alto grado potenzialmente asportabili radicalmente senza gravi deficit preoperatori (forza >4) | Procedura standard | Opzionale |
| | Neoplasie extracerebrali: meningiomi | Opzionale | Opzionale |
| | Neoplasie extracerebrali: metastasi | Opzionale | Opzionale |
| | Malformazioni vascolari (cavernomi, piccole MAV) | Opzionale | Opzionale |
| | PNET | Opzionale | Opzionale |
| Area motoria supplementare, area premotoria | Gliomi a basso grado | Opzionale | |
| | Gliomi ad alto grado potenzialmente asportabili radicalmente senza gravi deficit preoperatori (forza >4) | Opzionale | |
| | Neoplasie extracerebrali: meningiomi | Opzionale | |
| | Neoplasie extracerebrali: metastasi | Opzionale | |
| | Malformazioni vascolari (cavernomi, piccole MAV) | Opzionale | |
| | PNET | Opzionale | |

MAV: Malformazioni artero-venose; PNET: *Primitive Neuro-Ectodermal Tumors*

11.1.4.2 Chirurgia sottotentoriale

Possono essere condotte in telemedicina tutte le tecniche neurofisiologiche utilizzate nella chirurgia sottotentoriale di lesioni/malformazioni occupanti spazio, all'interno o adiacenti alle strutture nervose contenute nella fossa cranica posteriore. Vedere in proposito la Tabella 11.4.

Tabella 11.4. Protocollo intraoperatorio in fossa cranica posteriore, procedura IOM associata alla metodica opportuna, secondo le "Raccomandazioni del gruppo di lavoro intersocietario SINC-SINCh, 2010-2015" (5)

| Patologia | IOM | Metodiche |
|---|--------------------|---|
| Neoplasie dell'angolo ponto-cerebellare | Procedura standard | <p>*Monitoraggio del nervo acustico e di eventuali altre funzioni in rapporto all'estensione della neoplasia</p> <ul style="list-style-type: none"> • m-MEP • SEP • BAEP • EMG Free-Run • CMAP dei nervi cranici |
| Neoplasie intrinseche del tronco | Procedura standard | <p>*Mappaggio e monitoraggio delle funzioni del tronco in rapporto all'estensione della neoplasia</p> <ul style="list-style-type: none"> • m-MEP • vie lunghe • m-MEP dei nervi cranici • SEP • BAEP • EMG Free-Run • CMAP dei nervi cranici |

*Metodiche standard; m-MEP: *myogenic Motor Evoked Potentials*; CMAP: *Compound Muscle Action Potential*.

11.1.4.3 Chirurgia spinale e del sistema nervoso periferico

Possono essere condotte in telemedicina le tecniche neurofisiologiche utilizzate nella chirurgia vertebro-midollare (cervicale, dorsale, lombare e cono-cauda) e aortica di lesioni e/o malformazioni occupanti spazio all'interno, o adiacenti, alle vie midollari o delle fibre ad esse connesse.

Possono altresì essere usate nella chirurgia delle lesioni del nervo periferico e dei plessi.

In particolare, si sottolinea l'uso nelle lesioni del plesso brachiale, nell'asportazione delle lesioni o delle malformazioni o dei tessuti danneggiati da traumi e anche nella chirurgia ortopedica dei cingoli scapolare e pelvico.

Il rapporto tra metodiche, patologie, interventi chirurgici è schematizzato nella Tabella 11.5.

Tabella 11.5. Protocolli operativi con insiemi stabiliti di metodiche come suggeriti dalle “Raccomandazioni del gruppo di lavoro intersocietario SINC-SINCh, 2010-2015” (5), in relazione con le patologie o gli interventi chirurgici in cui sono più comunemente impiegati

| Patologia/ intervento | IOM | Metodiche | Note |
|--|--|--|---|
| Tumori intramidollari | Obbligatorio | m-MEP PES EMG Free-Run | PEM: consigliato montaggio completo degli elettrodi stimolanti <i>D-wave</i> obbligatoria per livelli craniali a T10 (se team esperto) <i>Mapping</i> delle colonne dorsali opzionale |
| Tumori extramidollari | Raccomandato (obbligatorio solo se manipolazione midollare) | m-MEP PES EMG Free-Run | <i>D-wave</i> consigliata, se team esperto, in casi particolari. |
| Discectomia cervicale anteriore | Opzionale | m-MEP PES EMG Free-Run | Consigliato monitoraggio m-MEP e EMG del deltoide ipsilaterale al lato di accesso |
| Decompressione posteriore cervicale o toracica | Opzionale | m-MEP PES EMG Free-Run | |
| Chirurgia del cono/cauda | Obbligatorio | m-MEP PES EMG Free-Run <i>Mapping</i> radici | |

11.2 Neurofisiologia intraoperatoria nel bambino

Analogamente a quanto riportato nel paragrafo precedente, le “Raccomandazioni del gruppo di lavoro intersocietario SINC-SINCh, 2010-2015” (5) chiariscono il ruolo dello N-IOM anche in ambito pediatrico con la frase che segue, anch’essa assunta integralmente a riferimento dal Gruppo di Consensus Nazionale:

“Il responsabile del monitoraggio intra-operatorio è, anche in ambito pediatrico, il neurofisiologo clinico o altra figura medica con adeguata competenza (N-IOM). Le tecniche di neurofisiologia intraoperatoria vengono eseguite dal TNFP sotto supervisione del responsabile del monitoraggio.”

Lo N-IOM fornisce la supervisione dell’intera procedura che, a maggior ragione in ambito pediatrico, deve comprendere la valutazione di alcuni specifici fattori del paziente per la pianificazione dello stesso IOM come: l’età, il grado di sviluppo e maturazione, la chiusura delle fontanelle, le patologie di base.

Gli obiettivi dell’intervento e la pianificazione dello IOM vanno condivisi con il neurochirurgo, e l’anestesista che ha l’arduo compito di garantire un rigoroso e costante *setting* anestesilogico.

Inoltre, lo N-IOM concorda con il TNFP le metodiche che verranno applicate e il montaggio adeguato.

11.2.1 Fattori influenti la neurofisiologia intraoperatoria in ambito pediatrico

La Neurofisiologia Intraoperatoria pediatrica (NIp) comprende sia le tecniche di monitoraggio che di mappaggio come descritto nel capitolo dell'adulto, ma, pur valendo le regole generali dell'adulto, vanno considerate alcune peculiarità che impongono specifici accorgimenti tecnici, oltre che cautela nell'interpretazione del segnale. Da tutto ciò originano diverse implicazioni di cui si deve tener conto ai fini della prognosi in ambito pediatrico.

Affinché un segnale neurofisiologico sia adeguato, l'attività di neurofisiologia intraoperatoria deve essere riproducibile nel tempo, con minima variabilità nelle diverse registrazioni e facilmente interpretabile, tutto ciò risulta più difficile nel bambino soprattutto nei primi mesi e anni di vita, mentre dalla preadolescenza in poi diventa più semplice e simile all'adulto. Neonati e bambini, soprattutto entro i primi tre anni di vita, sono neurologicamente immaturi. Ad esempio, la maturazione della sostanza bianca del cervello è un processo complesso, che dura dal terzo trimestre di gravidanza fino alla tarda adolescenza e procede in modo asincrono attraverso le regioni cerebrali (6). Questa immaturità comporta mielinizzazione incompleta, ridotta velocità di conduzione, incremento della durata del potenziale d'azione, elevata soglia di depolarizzazione, incremento della resistenza e ridotto numero di connessioni monosinaptiche tra il tratto corticospinale e i neuroni motori alfa.

Questi e altri fattori contribuiscono all'estrema sensibilità, ad esempio, dei potenziali motori evocati agli agenti anestetici, cambiamenti in morfologia, latenza, stabilità e riproducibilità dei segnali neurofisiologici nei neonati e nei bambini piccoli. Man mano che la maturazione procede, la sensibilità agli anestetici si riduce fino ad assomigliare all'adulto nei giovani sani. Oltre all'immaturità, la maggior frequenza di comorbidità e malattie genetiche in ambito pediatrico, può anche avere un impatto significativo sulla capacità di acquisire dati neurofisiologia intraoperatoria stabili e sull'effetto degli agenti anestetici sui segnali stessi (7-9).

Queste condizioni di base rendono il ruolo dello N-IOM e del TNFP più difficile e strettamente dipendente, oltre che da una specifica esperienza in NIp, anche da una continua e stretta collaborazione e comunicazione con il team di sala: ogni minima variazione della gestione anestesiológica del paziente può compromettere la monitorabilità soprattutto per i pazienti più piccoli, al di sotto dei tre anni.

Con queste premesse, l'erogazione dei servizi da parte dello N-IOM in NIp può essere fornita:

- di persona in sala operatoria;
- tramite un modello in telemedicina (tele-IOM) con servizi forniti dall'esterno della sala operatoria (ovvero da remoto) e con il TNFP in presenza;
- una combinazione di entrambi i modelli di cui sopra a seconda del tipo di intervento, delle esigenze del paziente e dell'autonomia professionale del TNFP in quest'ambito (ovvero con esperienza in ambito pediatrico) (2).

N-IOM e TNFP sono integrati con il personale di sala: anestesisti, infermieri di sala, radiologi e chirurghi.

Lo IOM viene suddiviso nelle 5 fasi descritte, si ricorda in particolare che nella fase 1, Montaggio, il posizionamento degli elettrodi nel bambino piccolo presenterà maggiori difficoltà per:

- a) spazio ridotto a disposizione (circonferenza cranica, dimensioni degli arti);
- b) ridotta resistenza della teca cranica del bambino rispetto all'adulto;
- c) necessità di evitare il posizionamento degli elettrodi nella zona cranica delle fontanelle se ancora aperte.

Anche in ambito pediatrico, come per l'adulto, decidere se e quali delle 5 fasi dello IOM seguire in tele-IOM o in presenza è responsabilità dello N-IOM. Egli può condurre interamente in remoto la propria opera e può decidere di recarsi fisicamente nella sala operatoria durante la fase n. 3 in casi selezionati, qualora se ne presenti la necessità (2).

Il Gruppo di Consensus Nazionale raccomanda che i presidi ospedalieri in cui si svolgono interventi di neurochirurgia siano dotati dei sistemi tecnologici necessari e della dotazione di personale qualificato per la corretta esecuzione di tele-IOM ove indicato dalle evidenze scientifiche.

11.2.2 Monitoraggio intraoperatorio in teleneurofisiologia pediatrica

Le tecniche di tele-IOM eseguibili in teleneurofisiologia pediatrica sono sostanzialmente quelle elencate nella parte generale. Qui di seguito viene riproposto l'elenco delle tecniche con a fianco alcune considerazioni specifiche dell'ambito pediatrico:

- a. *EEG*: È una metodica molto sensibile agli aspetti maturativi e di sviluppo, e sotto i 6 mesi di vita presenta importanti variazioni in corso di anestesia. Nel bambino si raccomanda sempre di registrare EEG per poter valutare la profondità dell'anestesia, la comparsa di crisi epilettiche o di stati di sofferenza sistemica.
- b. *ECoG*: L'utilizzo dell'ECoG è particolarmente indicato nella chirurgia sovratentoriale in ambito pediatrico non solo per la chirurgia dell'epilessia, ma in generale nel monitoraggio intraoperatorio anche come sistema di sicurezza durante la stimolazione elettrica diretta corticale visto che i parametri di stimolazione utilizzati derivano dall'esperienza nell'adulto.
- c. *EMG (Free-Run EMG)*: non variazioni rispetto all'adulto.
- d. *ENG*: considerare gli aspetti maturativi di mielinizzazione per l'interpretazione del segnale e i parametri di stimolazione.
- e. *SEP-VEP-BAEP*: latenza, ampiezza e morfologia delle diverse componenti dei potenziali subiscono significative variazioni dovute alla maturazione del sistema nervoso e delle vie sensoriali specifiche, soprattutto entro i tre anni di vita. Tecnicamente potrebbe essere necessario incrementare la finestra temporale di registrazione e ridurre la frequenza di stimolo per registrare componenti più stabili nel tempo (contrastare l'effetto degli anestetici combinato all'imaturità del sistema) (9).
- f. *PEM*: La maturazione del sistema motorio prosegue fino alla tarda adolescenza e presenza elevati livelli di variabilità maturativa in ambito pediatrico per pari età per cui la soglia di eccitabilità motoria a livello corticale non è prevedibile basandosi solo sull'età del paziente. La corteccia motoria nei bambini piccoli è spostata più ventralmente e nei bambini di età inferiore ai 3 anni può trovarsi fino a soli 20 mm dietro la sutura coronale per cui va modificato il posizionamento per la stimolazione motoria. Per ottenere i MEP da stimolazione elettrica transcranica o diretta corticale in ambito pediatrico spesso si devono utilizzare dei metodi di facilitazione come il doppio treno di stimoli o la stimolazione in continuo. Vi è maggiore variabilità in ampiezza e morfologia trial- to-trial e si può verificare una considerevole riduzione in ampiezza per decremento del drive corticospinale o dell'eccitabilità motoneuronale (*anesthetic fade* come effetto dell'anestesia) (5). La registrazione della *D-wave* da elettrodo epidurale per stimolazione

con singolo stimolo elettrico transcranico (10, 11) è possibile anche nel bambino ma più difficilmente ottenibile (case report per segnalazioni di registrazioni della *D-wave* in bambini al di sotto dei 2-3 anni di vita) (12).

- g. *Blink reflex*: non modificazioni rispetto all'adulto, si ricorre più frequentemente al doppio treno di stimoli.
- h. *Riflesso sacrale*: non modificazioni rispetto all'adulto, si ricorre più frequentemente al doppio treno di stimoli.

Tutte le tecniche di monitoraggio elencate sono potenzialmente effettuabili in tele-IOM, ma sussiste una rilevante limitazione in NIp soprattutto entro i tre anni di vita per la tele-IOM che impone molta cautela: la componente di monitoraggio dei segnali in NIp si caratterizza per il riconoscimento di chiari *warning* da riferire al neurochirurgo per le singole metodiche neurofisiologiche che solitamente corrispondono alla riduzione in ampiezza del 50% delle componenti dei potenziali somatosensitivi e acustici, la comparsa di attività EMG spontanea tipo *treno-A* per il nervo periferico/nervo cranico e la riduzione in ampiezza/alterazione della soglia di eccitabilità/semplificazione delle componenti per i PEM.

Questi *warning* sono stati identificati nell'adulto e vengono riportati anche per la NIp ma la loro interpretazione non può prescindere da tutti i fattori confondenti di cui abbiamo parlato.

11.2.3 Tecniche di mappaggio

Anche in NIp le tecniche di monitoraggio vengono integrate da tecniche di mappaggio. Talora invece si usano principalmente le tecniche di mappaggio, quando ad esempio i MEP sono ineccezionabili per elevata soglia di stimolazione e quindi non sicurezza dello stimolo (questo può accadere ad esempio nei primi giorni o settimane di vita).

Il mappaggio utilizza la stimolazione elettrica erogata mediante stimolatori monopolari o bipolari, direttamente sulle strutture nervose. Anche in questo caso le soglie di stimolazione e i parametri di stimolazione di sicurezza che vengono utilizzati sono quelli derivati dall'esperienza dell'adulto, senza sicura conferma della loro adeguatezza in NIp.

Il rischio di una stimolazione non adeguata è molto più rilevante in ambito pediatrico e deriva fondamentalmente da: stimolazione sottosoglia (i limiti di intensità utilizzati per l'adulto potrebbero essere non adeguati vista l'elevata della soglia di eccitabilità corticale tipica del sistema nervoso immaturo), stimolazione durante il periodo refrattario (può essere più duraturo nel bambino), stimolazione durante la persistenza prolungata dell'effetto delle manovre anestesologiche.

Quindi, sia per ragioni di sicurezza che per maggiori difficoltà interpretative, nella fase di mappaggio in NIp è assolutamente raccomandata la presenza diretta dello N-IOM.

11.3 Livello organizzativo in cui si colloca la prestazione/sequenza per tele-IOM

È responsabilità dello N-IOM decidere se e quali delle 5 fasi dello IOM seguire in tele-IOM o in presenza. Lo N-IOM può condurre interamente in remoto la propria opera e può decidere di recarsi fisicamente nella sala operatoria durante la fase n. 3 in casi selezionati, qualora se ne presenti la necessità (2). Vedere in proposito la Tabella 11.6 con le raccomandazioni riportate nelle note. Per i protocolli si rimanda al capitolo dell'adulto in quanto le indicazioni sono le

medesime, la variabile maggiore è la frequenza di presentazione delle diverse patologie per fasce d'età.

Ad esempio, in ambito pediatrico sono molto più frequenti rispetto all'adulto, oppure sono ad esclusivo appannaggio del bambino, le patologie malformative e su base genetica, come:

- i disrafismi spinali;
- le malformazioni di Arnold-Chiari;
- le patologie malformative della colonna;
- le paralisi cerebrali infantili;
- gli interventi di rizotomia selettiva per la spasticità;
- le neoplasie della fossa cranica posteriore e cerebellari;
- la chirurgia dell'epilessia per tumori disembrionoplastici neuroepiteliali;
- le patologie malformative delle vie aeree superiori.

Tabella 11.6. Possibilità di esecuzione del tele-IOM per paziente pediatrico, a secondo delle varie fasi di esecuzione, suddivise per modalità organizzative. Viene indicata anche quando sussiste la necessità di supervisione

| Fasi di esecuzione tele-IOM NIp | Intra-presidio (tele-IOM/supervisione ³) | Intra-aziendale (tele-IOM/supervisione ³) | Inter-aziendale (supervisione ³) |
|----------------------------------|--|--|--|
| Montaggio ⁽¹⁾ | sì | sì | sì |
| Fase preparatoria ⁽¹⁾ | sì | sì | sì |
| Fase operatoria | Monitoraggio Mappaggio | sì ⁽²⁾ /no se < 3 aa e se TNFP non esperto in NIp (possibilità di supervisione) | sì ⁽²⁾ /no se < 3 aa e se TNFP non esperto in NIp (possibilità di supervisione) |
| | | no/sì ⁽²⁾ con supervisione** | no/sì ⁽²⁾ con supervisione** |
| Chiusura | sì | sì | sì |
| Fase finale | sì | sì | sì |

⁽¹⁾ Raccomandazione del Gruppo di Consensus: l'eventuale teleassistenza TNFP è possibile in base al grado di autonomia che il TNFP di sala detiene, considerando in ciascun caso specifico sia la modalità di esecuzione del IOM sia la sua complessità.

⁽²⁾ Raccomandazione del Gruppo di Consensus: si tenga sempre presente che la possibilità di esecuzione del telemonitoraggio in fase operatoria dipende dalla complessità dell'intervento e dalle caratteristiche del paziente e la scelta è una responsabilità precisa dello specialista.

⁽³⁾ Il tele-IOM può avvalersi di una supervisione. Un secondo "N-IOM esperto", quando ubicato in struttura ospedaliera diversa da quella ove si svolge lo IOM e quindi non raggiungibile in tempo reale, o nei casi di mappaggio intraoperatorio, affianca in remoto lo N-IOM "locale". In questo caso la responsabilità dello IOM viene condivisa tra lo N-IOM locale e il supervisore, il quale controfirmerà digitalmente il referto del monitoraggio o anche con firma autografa in modalità differita, ove vi siano casi di necessità.

Si confermano le specifiche già descritte per l'adulto in merito alla dotazione tecnologica minima indispensabile e alle apparecchiature dedicate. Per quanto riguarda le limitazioni e controindicazioni evidenziate nel capitolo riguardante l'adulto, compresi i limiti di esecuzione nella pratica, le modalità di gestione del rischio clinico specifico e le azioni di mitigazione da condurre in caso di eventi avversi, si specificano gli elementi peculiari in ambito pediatrico.

Limiti di esecuzione nella pratica:

- Per pazienti al di sotto di 3 anni, tutte le fasi tecniche devono essere effettuate e gestite da TNFP esperti in NIp.

- Per casi complessi di pazienti al di sopra dei 3 anni, durante tutte le fasi tecniche, si consiglia di affiancare il TNFP non esperto in NIp a TNFP esperti in NIp, anche in tele-assistenza tecnica.

Lo N-IOM locale è direttamente responsabile della refertazione di tele-IOM (eventualmente condivisa con lo N-IOM esperto interpellato in teleconsulto con funzione di supervisore) e per tale ragione sarà discrezione del/degli N-IOM decidere se l'assistenza e/o supervisione in tele-IOM è applicabile o meno al caso specifico e alla modalità specifica. Tale decisione richiede la conoscenza approfondita del team di sala e il livello di competenza dello N-IOM locale e del TNFP.

11.4 Considerazioni conclusive per tele-IOM in neurofisiologia pediatrica

Tutte le tecniche di neurofisiologia intraoperatoria pediatrica hanno lo scopo di rilevare in tempo reale un possibile danno delle aree e delle fibre ad esse connesse, conseguenti ad un trauma diretto o indiretto al tessuto nervoso o ad un danno ischemico o compressivo/distrattivo nel corso dell'atto chirurgico.

Il ricorso a tele-IOM non deve in nessun modo condizionare la possibilità di applicare gli standard qualitativi dello IOM stesso, né la possibilità di applicazione dei protocolli completi specifici per ogni tipo di chirurgia/patologia raccomandati a suo tempo dal Gruppo di lavoro intersocietario SINC-SINCh (5). Tutto ciò è di esclusiva responsabilità decisionale dello N-IOM della struttura erogante la prestazione.

In tutti i protocolli di tele-IOM è fortemente raccomandata una puntuale fase preparatoria all'intervento allo scopo di condividere tutte le fasi dell'intervento fra i vari attori del team, che permette di ottimizzare la successiva comunicazione intraoperatoria e il conseguente processo decisionale con il chirurgo (11).

Il Gruppo di Consensus Nazionale raccomanda la costante verifica peri-operatoria delle risorse audiovisive multimodali che permettano il *feedback* continuo con la postazione del responsabile neurofisiologico da remoto. A tale scopo è ritenuto largamente insufficiente il solo accesso vocale diretto (tramite rete fissa o rete cellulare) per la comunicazione peri-operatoria con l'equipe chirurgica dello N-IOM.

Tra i limiti di limiti di esecuzione nella pratica in tele-IOM si annoverano:

- Mancanza di standardizzazione e integrazione tra le équipe intraoperatorie di sala.
- Insufficiente preparazione del programma operatorio.
- Limiti tecnologici, legati ad una inadeguata dotazione tecnica.
- Eccessiva mole di dati video e neurofisiologici, magari provenienti da più sale operatorie, che possono inficiare la corretta interpretazione dei dati di neuro-monitoraggio, soprattutto se si tratta di più interventi processati contemporaneamente (cfr. Fattore distraibilità). Il monitoraggio in remoto di più interventi chirurgici aumenta peraltro i tempi di latenza, reazione e feedback, nella gestione del warning, e quindi si consiglia di limitarne l'uso.

Tra le azioni di mitigazione del rischio clinico specifico e della condotta di eventi avversi si segnalano:

- Corsi di formazione dedicata per gli operatori corredati audit interni specifici.

- Potenziamento tecnologico volto a facilitare al massimo la valutazione in tempo reale dell'enorme mole di dati neurofisiologici corredati dai video del campo operatorio, del monitor anestesilogico da parte del responsabile N-IOM da remoto.
- Attivazione di modalità di comunicazione alternativa in caso di qualsiasi tipo di default del sistema di telemedicina con audiovisivi multimodali.

Bibliografia

1. Nuwer MR, Cohen BH, Shepard KM. Practice patterns for intraoperative neurophysiologic monitoring. *Neurology*. 2013;80:1156–60.
2. Emerson RG. Remote monitoring. In: Husain AM (Ed.) *A practical approach to neurophysiologic intraoperative monitoring*. New York: Demos Medical Publishing; 2008. p. 45-54.
3. Gertsch JH, Moreira JJ, Lee GR, Hastings JD, Ritzl E, Eccher MA, *et al.* Practice guidelines for the supervising professional: intraoperative neurophysiological monitoring. *J Clin Monit Comput*. 2019; 33(2):175-83. <https://doi.org/10.1007/s10877-018-0201-9>
4. Skinner SA, Aydinlar EI, Borges LF, Carter BS, Currier BL, Deletis V, *et al.* Is the new ASNMM intraoperative neuromonitoring supervision “guideline” a trustworthy guideline? A commentary. *J Clin Monit Comput*. 2019; 33(2):185-90. <https://doi.org/10.1007/s10877-018-00242-3>
5. Gruppo di lavoro intersocietario SINC-SINch. *Monitoraggio Neurofisiologico Intraoperatorio in Neurochirurgia. Raccomandazioni del Gruppo di Lavoro Intersocietario Società Italiana di Neurofisiologia Clinica (SINC)-Società Italiana di Neurochirurgia (SINch)*. Roma: Società Italiana di Neurofisiologia Clinica; 2015. Disponibile all'indirizzo: https://www.sinc-italia.it/pdf/DOCUMENTO_INTERSOCIETARIO_IOM_2016.pdf; ultima consultazione 12/01/2023.
6. Davidson A, Skowno J. Neuromonitoring in paediatric anaesthesia. *Curr Opin Anaesthesiol*. 2019; 32(3):370-6. <https://doi.org/10.1097/ACO.0000000000000732>
7. Yakovlev PL, Lecours AR. The myelogenetic cycles of regional maturation of the brain. In: Minkowski A (Ed.) *Regional development of the brain in early life*. Oxford: Blackwell; 1967. p. 3-70.
8. Busso VO, McAuliffe JJ. Intraoperative neurophysiological monitoring in pediatric neurosurgery. *Paediatr Anaesth*. 2014; 24(7):690-7. <https://doi.org/10.1111/pan.12431>
9. McIntyre IW, Francis L, McAuliffe JJ. Transcranial motor-evoked potentials are more readily acquired than somatosensory-evoked potentials in children younger than 6 years. *Anesth Analg*. 2016;122(1):212–8. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000001044>
10. Costa P, Peretta P, Faccani G. Relevance of intraoperative D wave in spine and spinal cord surgeries. *Eur Spine J*. 2013;22(4):840-8. <https://doi.org/10.1007/s00586-012-2576-5>
11. Olmsted ZT, Ryu B, Phayal G, Green R, Lo S-FL, Sciubba DM, *et al.* Direct wave intraoperative neuromonitoring for spinal tumor resection: A focused review. *World Neurosurg X*. 2023;17(100139):100139. <https://doi.org/10.1016/j.wnsx.2022.100139>
12. Herta J, Yildiz E, Marhofer D, Czech T, Reinprecht A, Rössler K, *et al.* Feasibility of intraoperative motor evoked potential monitoring during tethered cord surgery in infants younger than 12 months. *Childs Nerv Syst*. 2022;38(2):397-405. <https://doi.org/10.1007/s00381-021-05316-3>.