



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI MEDICINA E CHIRURGIA

Corso di Laurea in Fisioterapia

**Interferenza cognitivo-motoria
nella promozione del gesto sportivo:
studio controllato su tDCS frontale e
training cognitivo**

Relatore

Prof.ssa Marianna Capecci

Tesi di Laurea di

Luigi Carriero

Anno Accademico 2018/2019

INDICE

Introduzione	5
CAPITOLO 1.	6
Performance atletica ed abilità cognitive	6
Basi neurofisiologiche	13
<i>Action Observation Network (AON)</i>	13
<i>Ruolo della corteccia frontale inferiore IFC</i>	17
<i>Ruolo della corteccia orbito-frontale: apprendimento per errore</i>	22
CAPITOLO 2.	25
Stimolazione cerebrale non invasiva	25
<i>La neuroplasticità</i>	25
<i>La long Term Potentiation LTP</i>	28
<i>Aspetti fisiologici della LTP</i>	28
<i>Aspetti biochimici</i>	30
La stimolazione cerebrale transcranica	31
La stimolazione transcranica a corrente diretta (tDCS)	32
<i>Variazione nella stimolazione</i>	37
<i>Sicurezza e tollerabilità della tDCS</i>	37
<i>Considerazioni etiche</i>	38
<i>tDCS ed applicazione nello sport</i>	39
Training cognitivo ed applicazione nello sport	46

CAPITOLO 3 - PARTE SPERIMENTALE	49
Introduzione	49
Obiettivi	54
Metodi	54
<i>Disegno dello studio</i>	54
Partecipanti	55
<i>Criteri di eleggibilità</i>	55
Setting	55
Intervento	56
<i>Stimolazione transcranica a corrente continua (tDCS)</i>	56
<i>Training video a casa</i>	56
Valutazione e misure di outcome	57
<i>Raccolta dati</i>	57
<i>Variabili esplicative</i>	57
<i>Misure di outcome primarie</i>	60
<i>Misure di outcome secondarie</i>	61
Timing di valutazione	63
Dimensione del campione	64
Metodi statistici	64
Risultati	65
Dati preliminari	65
Risultati dell'analisi pre- e post-test	65
Confronto risultati intra-gruppo	65

<i>Task motorio</i>	65
<i>Action Prediction Task</i>	66
Confronto risultati inter-gruppo	67
Analisi di correlazione	68
Discussione	70
Limitazioni	76
Conclusione	76
Figure	77
Tabelle	100
Bibliografia	101

Introduzione

Il miglioramento della performance motoria nello sport è l'obiettivo principale per un atleta che vuole aumentare le sue capacità di coordinazione, forza, intensità, e riuscita nel task motorio dello sport che pratica. È evidente, altresì, come l'aumento della fluidità, propriocezione, senso dello spazio e del tempo sono inequivocabilmente correlati ad un impegno cognitivo importante come la concentrazione, la lucidità, la memoria, la scaltrezza, il senso della posizione e tante altre variabili che sono indispensabili per portare al massimo grado di potenzialità quel determinato task motorio.

Molti studi dell'ultimo decennio si sono orientati in questa direzione per comprendere come funzioni l'interferenza cognitiva sul gesto motorio e quanto possa essere utile a garantire un effettivo, e statisticamente valido, miglioramento della performance.

L'allenamento cognitivo è, dunque, sempre più richiesto dai professionisti sportivi d'élite perché permette di raggiungere obiettivi sempre più difficili e di poter "competere" alla pari con altri atleti che raggiungono la stessa ferrea preparazione.

CAPITOLO 1.

Performance atletica ed abilità cognitive

Gli atleti d'élite sono continuamente concentrati a mantenere alte quelle funzioni cognitive necessarie per rendere al meglio la performance atletica per cui sono chiamati a rispondere, quindi hanno necessità di avere una buona attitudine al mantenimento dell'attenzione, al processo decisionale ed una memoria di lavoro efficiente per gestire e trarre il massimo vantaggio da situazioni il cui carico di stress è elevato (competizioni di alto livello, competizioni di notevole importanza) e la cui performance è sottoposta a condizioni di richieste esigenti.

Negli ultimi anni l'abilità cognitiva è vertiginosamente aumentata di interesse soprattutto nelle capacità predittive, comprensive e nel possibile miglioramento della prestazione sportiva d'élite (Yarrow K) (Walsh) (Katwala).

Attualmente la ricerca si è focalizzata principalmente sulle abilità psicologiche degli atleti e su tecniche terapeutiche per regolare e controllare le emozioni (terapia cognitivo-comportamentale), ma nella letteratura scarseggiano studi sul possibile miglioramento delle prestazioni sportive se vengono migliorate abilità cognitive di base.

Quando si parla di contesti che richiedono intelligenza solitamente ci si riferisce alla matematica, agli scacchi, alla scienza, alla musica, all'arte, ecc. ma raramente allo sport. Se si considerano, però, le sfide che gli atleti devono affrontare difficilmente è riscontrabile una qualsiasi attività umana che abbia più richieste funzionali (forse ad eccezione dei soldati in combattimento); eppure le capacità che deve acquisire uno sportivo professionista richiedono anni di allenamento al massimo comparabili, ma principalmente superiori anche più del doppio, a quelli di studio per gli esperti nelle

discipline sopracitate. Lo sportivo infatti nella sua educazione dei gesti motori che deve compiere ha necessità di sviluppare abilità di autocontrollo. Allo sportivo di alto livello sono richieste cospicue capacità mnemoniche di gesti sport specifici, come ad esempio un canoista che deve memorizzare fino ad massimo di circa 75 eventi al minuto, molta capacità di autocontrollo, apprendimento, pianificazione a lungo termine, capacità di superare gli infortuni, resilienza al fallimento, alle sconfitte e al giudizio per le continue pressioni psicologiche da affrontare come il feedback dei compagni di squadra, allenatori, tifosi, sponsor, media, ecc..

Studi di (Mann DT) e (Voss MW) hanno dimostrato come gli atleti siano in grado di eseguire più velocemente e con maggior precisione task cognitivi specifici e che le capacità cognitive di base siano in grado di anticipare i risultati sportivi futuri (G. R. Vestberg T.) (Mangine GT.) (G. R. Vestberg T.).

Questi risultati sono significativamente importanti per eventuali modifiche migliorative dei protocolli di allenamento e riabilitazione post infortunio ma non è ancora possibile capire quanto l'addestramento cognitivo possa portare miglioramenti significativi delle performance sportive. Per questo motivo è fondamentale dirigere rapidamente lo sguardo verso questo nuovo orizzonte che, per ora, è fin troppo poco conosciuto ma che potrebbe condurre ad importanti miglioramenti nella pianificazione di tempistiche, o adozione di nuove tecniche, negli allenamenti da parte di allenatori e preparatori atletici.

L'obiettivo principale dell'allenamento cognitivo è mirato al miglioramento delle funzioni cognitive specifiche, tramite esercizi svolti con un computer ed in maniera ripetuta, in cui la complessità e i compiti cambiano frequentemente, intra ed inter-sessione, in conformità con i cambiamenti nelle prestazioni individuali per evitare sovra o sotto-stimolazione.

Gli studi finora condotti sul training cognitivo (CT) hanno avuto una popolazione caratterizzata prevalentemente da un pregresso deficit funzionale a causa di patologie neurodegenerative, psichiatriche o disturbi neurologici di varia natura ed il miglioramento è avvenuto nella riacquisizione delle abilità perdute o nella capacità di conservazione di quelle residue. Nel post-allenamento cognitivo sono stati misurati miglioramenti delle prestazioni ai test cognitivi, supponendo che questi rappresentino un potenziamento delle capacità nell'ambito specifico (Keshavan MS) (Lampit A) (Leung IH) (Hallock H) (Hill NT) (Motter JN) Tuttavia, il trasferimento di questi risultati nell'ambiente sportivo non è noto, perché gli atleti d'élite hanno già raggiunto capacità tali che permettono un funzionamento superiore di specifici domini e quindi non è provato che il training cognitivo possa effettivamente migliorare la loro performance cognitiva.

Gli studi sul training cognitivo hanno incontrato alcune limitazioni nell'affermarsi a causa delle piccole dimensioni del campione, per la scarsa sensibilità di definizione del miglioramento nelle capacità funzionali e l'elevata eterogeneità della metodologia degli studi (M. L. Walton CC).

Alcune aziende (NeuroTracker, Axon Sports) forniscono software che generano esercizi che assomigliano a CT per aumentare le capacità nelle prestazioni sportive ed è promettente sapere che numerosi atleti ed allenatori usufruiscano di queste tecnologie innovative ma le prove sull'efficacia di questi allenamenti sono compromesse dalla presenza di studi finanziati e condotti dalle stesse società produttrici mancando, quindi, di prove scientifiche evidenti.

Studi sull'allenamento cognitivo nello sport sono molto meno rispetto ad altri campi di interesse e nella review di (Harris DJ), tra i vari studi che analizzavano gli effetti

dell'allenamento cognitivo, è stato individuando solamente uno studio che considerava soggetti sportivi (Romeas T.) in cui veniva richiesto di mantenere la traccia di più oggetti in movimento in un campo visivo dinamico e mutevole tramite uno strumento. Questi task motori sono facilmente avvicinabili alle richieste di un giocatore sportivo d'élite che ha necessità di avere sotto controllo costantemente la propria posizione nello spazio da gioco, quello degli eventuali compagni e quello degli avversari.

Lo studio di (Faubert), che prevedeva due allenamenti specifici a settimana per 5 settimane, ha dimostrato come gli atleti d'élite abbiano una migliore capacità di imparare ad elaborare complesse scene visive dinamiche consentendo loro di esprimere una grande abilità d'azione rispetto ai non atleti ed agli atleti non professionisti e manifestando, rispetto agli atleti non sottoposti a questo tipo di allenamento specifico, un miglioramento del 15% sulla performance.

L'aspetto negativo di questo studio è l'esiguo campione su cui è basata la statistica (appena 7 atleti) e sia perché probabilmente è stato condotto da ricercatori con un probabile interesse alla commercializzazione dello strumento utilizzato per l'allenamento.

Questo dimostra come studi condotti con strumenti molto costosi e con un probabile rendiconto finanziario elevato sono difficilmente eseguibili con rigoroso metodo scientifico (Rabipour S) (Simons DJ).

Solo negli USA la valutazione del mercato per gli strumenti finalizzati all'allenamento cognitivo si aggira intorno a 1.98 miliardi di dollari con una previsione di crescita fino a 8 miliardi nel 2021 (marketsandmarkets.com). È inevitabile, quindi, continuare ad approfondire questi studi rivolti all'ambito sportivo con il fine di assecondare il crescente

interesse nella promozione del training cognitivo che comincia ad essere considerato parte integrante dell'allenamento, soprattutto negli atleti d'élite.

Gli studi di (G. A. Romeas T) e (Hirao T) hanno confrontato gruppi di atleti sottoposti o meno ad un allenamento cognitivo con studi randomizzati controllati ed hanno avuto risultati incoraggianti tuttavia è necessario raccogliere ulteriori dati a causa dei probabili studi non pubblicati per risultati nulli o negativi (K. R. Walton CC).

È doveroso citare, inoltre, ulteriori studi che hanno esaminato altre tecniche di training sia di tipo cognitivo che di abilità percettive raccolte nella review di (Hadlow SM). Alcuni di questi video, infatti, si basavano sulla formazione con video altamente specifici per il risultato, ad esempio predire rapidamente la direzione del colpo di un battitore (M. D. Hopwood M), allenamento basato sull'esecuzione di compiti al computer (Fery YA) e la capacità di prendere decisioni immediate in situazioni sportive (B. K. Lorains M). Questi lavori appaiono molto interessanti e sembrano essere perlopiù un metodo alternativo ad un vero e proprio training cognitivo, dato che è richiesto solo l'utilizzo di una piattaforma computerizzata per la pratica del gesto sportivo specifico. Quando parliamo di allenamento cognitivo, in questo caso nell'ambito sportivo, dovremmo avere come target finale funzioni cognitive specifiche che portino risultati che siano finalizzati al miglioramento dei processi cognitivi che possano portare ad un reale miglioramento della performance sportiva. Nonostante i risultati siano incoraggianti, la popolazione presa in esame, negli studi finora condotti, è principalmente quella di persone anziane e la complessità del lavoro quella di trovare un metodo ottimale per determinare l'efficacia dell'applicazione dell'allenamento cognitivo su tutte le coorti prese in esame. Quantunque il CT mostri risultati migliorativi nelle prestazioni cognitive nei test sugli anziani, questi non incidono sui miglioramenti nelle ADL o nella diminuzione della probabilità di sviluppare una demenza (RN).

È dunque necessario capire sia se i risultati sono trasferibili agli atleti, soprattutto d'élite, sia se il miglioramento registrato è effettivamente riscontrabile rispettivamente nelle attività di vita quotidiana e nella performance del gesto sportivo sia per lo stesso atleta che per l'allenatore.

Una criticità sostanziale dell'allenamento cognitivo è la ridotta sostenibilità di prove per il miglioramento a lungo termine delle prestazioni, molto probabilmente a causa di mancanza di test sensibili e per la difficoltà nel raccogliere risultati accurati nel follow-up.

Lo sport prevede molte variabili che possono influire sulla prestazione sportiva perché può incidere lo stato mentale, la presenza di infortuni, disturbi del sonno, lo stato nutrizionale, le prestazioni dei compagni di squadra come anche le condizioni meteorologiche e le naturali variabili delle prestazioni. È quindi difficile trovare un Marker oggettivo che possa identificare il cambiamento nelle prestazioni, soprattutto negli sport di squadra, quindi la cosa che si cerca di fare adesso è di valutare le prestazioni in tempi prolungati e cioè di valutare preferenzialmente le prestazioni sportive nell'arco delle stagioni (G. R. Vestberg T.) (Mangine GT.) considerando sempre la difficoltà di determinare l'impatto unico che il CT può aver avuto. Un possibile modo per risolvere questi problemi è di monitorare le prestazioni sportive in ambienti controllati (G. A. Romeas T)svolgendo test che valutano abilità sportive specifiche, come ad esempio il processo decisionale della Working Memory e i tempi di reazione a diversi stimoli, in soggetti sottoposti a training cognitivo e poi confrontati con un gruppo di controllo (G. A. Romeas T) (Smith D).

Un altro modo per semplificare questo problema potrebbe essere la combinazione della componente fisica e cognitiva utilizzando la realtà virtuale con il VR consentendo di

mantenere i parametri di test costanti e di adattarla alle capacità dell'atleta. Ad esempio, per testare il tempo di reazione potrebbero essere richiesti test neuropsicologici computerizzati chiedendo al soggetto di premere un tasto il più rapidamente possibile visto uno stimolo specifico, oppure misurando il tempo di reazione per iniziare un movimento dopo aver visto un oggetto muoversi, ad esempio quando il portiere decide in quale direzione tuffarsi davanti ad un calcio di rigore. In ambiente VR possono essere controllate la velocità, la posizione e la traiettoria dell'oggetto e questi test possono essere sport specifici a differenza dei test neuropsicologici. Inoltre, gli stimoli possono essere facilmente adattati alle capacità dell'atleta, alla tipologia di sport, alle situazioni sport-specifiche e nel tempo che si desidera.

La realtà virtuale si candida in prospettiva come strumento affidabile e controllato per misurare efficacemente i cambiamenti post- allenamento e per la formazione di test con un potenziale approccio olistico per gli atleti.

Infine, quello che appare evidente è che le abilità cognitive, come la previsione dell'esito di un'azione, sono certamente significative sia nella vita sociale ma soprattutto nella vita sportiva.

Basi neurofisiologiche

Action Observation Network (AON)

Così come nella vita sociale che nello sport esercitato ad alti livelli, la capacità di comprendere e percepire le azioni degli altri individui è un'abilità cognitiva indispensabile. La "rete di osservazione dell'azione" (AON) è costituita da circuiti neurali attivati nel momento in cui osserviamo un'altra persona svolgere un compito che conosciamo (di cui quindi abbiamo già la sua rappresentazione mentale) e la letteratura finora prodotta concorda nel considerare coinvolte in questa "rete" le aree della corteccia frontale, parietale e temporale (Keysers C) (Gazzola V) (Caspers S) (Van Overwalle F).

Più precisamente diversi studi hanno dimostrato che sono implicati, nel dualismo percezione-esecuzione dell'azione, la corteccia frontale inferiore (IFC), la corteccia ventrale premotoria, il giro frontale inferiore e la corteccia parietale; considerati quindi come importanti nodi di AON (Chong TT) (Etzel JA) (N. A. Kilner JM) (Oosterhof NN). Una lesione virtuale, ad esempio, nella regione dell'IFC interrompe l'osservazione dell'azione e la facilitazione motoria correlata definendo questa struttura come cruciale nella simulazione delle azioni di mediazione nella corteccia motoria (M1) (B. N. Avenanti A) (vedi Figura 1)

Studi su una popolazione di scimmie hanno evidenziato la presenza di un pool di neuroni nell'area fronto-parietale, successivamente chiamati "neuroni specchio" (Pellegrino G) (Fogassi L), che aumentavano l'attività di scarica elettrica sia durante la percezione di azioni eseguite da altri sia durante la loro esecuzione della stessa azione. Questi neuroni hanno registrato un'ulteriore attivazione quando veniva confrontata l'azione osservata con la rappresentazione motoria interna di azioni uguali o simili.

Volendo trasferire questi risultati ottenuti dalle scimmie sugli esseri umani sono stati condotti studi che utilizzavano la stimolazione magnetica transcranica (TMS) dimostrando che le scariche neuronali dei circuiti motori corticospinali erano attivate sia durante l'osservazione di azioni di altri individui che durante l'esecuzione delle stesse (Fadiga L) (C. P. Aglioti SM).

I modelli teorici della percezione dell'azione hanno sottolineato la natura predittiva dell'AON fronto-parietale (Wilson M) (F. K. Kilner JM) (P. W. Schutz-Bosbach S) (Friston K) (Press C) (Schippers MB) ed hanno suggerito come la percezione di un'azione osservata sia regolata dalla presenza di circuiti neuronali che regolano modelli interni evoluti, i quali permettono la previsione dell'evento che sta per svolgersi da altri esseri umani.

A seguito di questi risultati, studi neurofisiologici hanno dimostrato che M1 mostra una distorsione anticipatoria nella risposta motoria delle azioni osservate (Gangitano M) (V. C. Kilner JM) (Borroni P) (M.-P. I. Avenanti A). Se si utilizzano potenziali motori evocati (MEP) indotti da spTMS, M1 risulta attivato durante la percezione di immagini statiche di azioni umane continue ma incomplete (azioni implicite) (M. V. Urgesi C) (V. C. Candidi M). Dato che la facilitazione motoria è apparsa maggiore nella fase inizio-centrale, durante l'osservazione di azioni della mano, rispetto alle fasi finali (M. V. Urgesi C) (M. M. Urgesi C) si può presumere che il sistema motorio è più reattivo nelle fasi di azioni implicite osservate che riflettono la simulazione anticipatoria del futuro movimento (M. M. Urgesi C) (Wilson M).

Se molteplici sono gli studi che sostengono il coinvolgimento dell'AON fronto-parietale nell'attivazione di M1 (V. V. Koch G) (Catmur C) (B. N. Avenanti A), pochi sono gli studi al sostegno del coinvolgimento dell'IFC nella simulazione del futuro di azioni osservate.

Non è ancora chiaro, inoltre, se l'AON fronto-parietale svolga attivamente un ruolo cruciale per la codifica anticipatoria motoria dell'azione osservata (Wilson M) (V. C. Kilner JM) (Friston K) (P. M. Aglioti SM), oppure se questa abbia un ruolo secondario, quindi passivo, nell'elaborazione dei dati provenienti dai nodi visivi dell'AON (solco temporale superiore, STS) come conseguenza di associazioni visuomotorie precedentemente apprese (Hickok).

Durante l'osservazione dell'azione le informazioni che provengono dall'area visiva attraversano il solco temporale superiore TST e raggiungono l'AON frontale (L. G. Rizzolatti G) (H. R. Nishitani N) (A. S. Nishitani N), un'area visiva di alto livello con neuroni che codificano stimoli di movimento biologico reale o apparente (Keysers C) e che si attivano anche nell'osservazione di immagini statiche di posture corporee che implicano un'azione (Peigneux P) (Jellema T).

I neuroni in STS mostrano una risposta anticipatoria all'osservazione di azioni (Perrett DI) ma non rispondono all'esecuzione dell'azione non avendo quindi le classiche proprietà dei "neuroni specchio". Per comprendere la relazione funzionale tra la corteccia fronto-parietale ed i nodi visivi dell'AON, nel prevedere un'azione di mediazione, è di testare la facilitazione motoria all'azione implicita dopo che è avvenuta una perturbazione neurale ed elaborazione sia all'interno (IFC) o a monte (STS) del nodo fronto-parietale dell'AON.

La simulazione di un'azione anticipata in M1 può essere interrotta da una perturbazione su IFC e porterebbe ad un effetto opposto se stimolassimo STS. Se l'AON fosse organizzato come un sistema a feedforward "passivo", dove i nodi AON fronto-parietali rifletterebbero passivamente i calcoli effettuati in STS grazie all'accoppiamento sensorimotorio, la soppressione di STS dovrebbe ridurre il flusso di informazioni che

raggiungono l'AON e quindi dovrebbe diminuire il flusso di informazioni che raggiungono l'AON diminuendo l'attività di simulazione nella rete (e di conseguenza in M1). Tuttavia, dopo aver soppresso STS si è registrato un aumento compensativo della simulazione dell'azione (A. L. Avenanti A).

Questo dimostra un sistema di controllo dinamico in cui le informazioni dai nodi visivi (STS) raggiungono i nodi visuo-motori (fronto-parietali) per poi tornare nuovamente alle aree visive (Schippers MB). In questo senso l'attività di simulazione motoria, nelle regioni fronto-parietali, viene attivata per risolvere calcoli fondamentali riguardo le diverse complessità nella percezione dell'azione (ad esempio, completare informazioni mancanti, interpretare nel miglior modo informazioni ambigue (Wilson M) (P. W. Schutz-Bosbach S) (P. M. Aglioti SM) (U. C. Avenanti A). Un aumento del "rumore" nella rappresentazione percettiva delle azioni richiederebbe l'aumento della funzione di "riempimento" basati su modelli di azione interni (F. K. Kilner JM) (Gazzola V) (Friston K) (Schippers MB) (D'Ausilio A).

Dunque, l'interruzione dell'elaborazione visiva in STS sembra determinare un aumento di attività nell'AO fronto-parietale e questo comporterebbe una maggiore facilitazione di M1.

Partendo da queste ipotesi è interessante condurre un test che discrimini il diverso funzionamento di M1 qualora venisse alterata l'attività neurale di IFC o di STS e vedere come quest'ultime influenzino M1. Studi di questo genere, condotti su primati non umani, usando una procedura adatta a disattivare temporaneamente un'area visiva di ordine superiore (centro temporale, MT) e quindi interrompendo l'attività di una singola cellula nella corteccia visiva primaria (V1), hanno dimostrato che la presenza di un rapporto di causalità tra le due aree (Hupe JM).

La stimolazione cerebrale si presenta come il metodo più interessante da usare per esplorare, in maniera diretta e non invasivamente alterando transitoriamente una regione bersaglio del cervello, le possibili modificazioni nelle risposte neurali di M1 (C. M. Avenanti A) (B. N. Avenanti A). Utilizzando questo approccio è possibile condurre test su umani indagando le connessioni con i relativi rapporti di causalità tra i diversi nodi di una determinata rete neurale (Paus).

Ruolo della corteccia frontale inferiore IFC

Diversi studi hanno mostrato che durante l'osservazione e l'esecuzione di azioni è attivata sia la corteccia frontale che quella parietale. Durante l'osservazione delle azioni, invece, si attivano anche i neuroni della regione temporale STS, la quale sembra svolgere un ruolo cruciale per la percezione del movimento biologico e per comunicare all'AO fronto-parietale ordini superiori di rappresentazioni visive delle azioni osservate (H. A. Pobric G). (Keysers C) (L. G. Rizzolatti G). Studi precedenti su lesioni "virtuali" o reali hanno dimostrato che sia l'area IFC (H. A. Pobric G) (C. M. Urgesi C) (Moro V) (Pazzaglia M) (Tidoni E) (B. N. Avenanti A) sia STS (Grossman ED) (Saygin) (S. B. Candidi M) sono essenziali nella rappresentazione dell'azione osservata tuttavia non è chiaro quale sia il ruolo specifico delle due aree, frontale e parietale, nel processo di simulazione di azioni implicite.

Lo studio di Avenanti (A. L. Avenanti A) ha utilizzato la TMS per inibire transitoriamente l'attività corticale sia all'interno (IFC) che a monte (STS) dell'AON fronto-parietale. I risultati ottenuti hanno evidenziato come la soppressione dell'attività di IFC altera la facilitazione motoria, durante l'osservazione di stimoli impliciti, e che la simulazione motoria in M1 è collegata in maniera significativa all'attività del nodo anteriore dell'AON.

Questo studio ha dimostrato come, interrompendo l'attività dell'area STS, venisse potenziata la simulazione motoria denotando un ruolo attivo dell'AO fronto-parietale e soprattutto l'esistenza di una diretta interazione funzionale IFC-STS-M1 quando è necessario desumere informazioni dinamiche, relative all'azione, da immagini statiche.

I dati neurofisiologici raccolti in questo studio supportano teorie predittive di percezione dell'azione (RI.) (Wilson M) (F. K. Kilner JM) (P. W. Schutz-Bosbach S) (Friston K) (Press C) (Schippers MB) secondo le quali l'AON è organizzato come un sistema di controllo dinamico in cui le informazioni possono fluire sia dalla componente visuale (STS) alla visuomotoria (fronto-parietale) sia in maniera opposta, da IFC a STS. In accordo con quanto detto, si attiva un circuito neuronale di rappresentazioni motorie memorizzate, nei nodi fronto-parietali, che riconosce un modello interno dell'azione che si sta sviluppando. Questi modelli di rappresentazione sono presumibilmente utilizzati per prevedere il futuro corso dell'azione che si sta osservando ed avere un grado percettivo di stabilità sufficiente per affrontare possibili percezioni ambigue che derivano dalla discontinuità nell'input sensoriale. Queste teorie sostengono che una interruzione delle informazioni visive richiederebbero la compensazione da parte del sistema motorio, il quale aumenterebbe la sua attività per garantire una percezione dell'azione in maniera stabile (Wilson M) (Friston K) (Schippers MB) (P. M. Aglioti SM) (U. C. Avenanti A).

I modelli teorici finora prodotti suggeriscono che il sistema motorio dell'uomo abbia la possibilità di funzionare come un "dispositivo di anticipazione", permettendo la predizione di azioni future, utilizzando il proprio sistema motorio come modello interno di riferimento (Gazzola V) (P. W. Schutz-Bosbach S) (Wolpert DM). Gli studi effettuati su uomo e scimmie suggeriscono che avvengono attivazioni del sistema motorio contingenti all'osservazione poiché:

- 1) si verificano prima dell'osservazione di un'azione con gesto motorio prevedibile (Fogassi L) (C. P. Aglioti SM) (V. C. Kilner JM) (M.-P. I. Avenanti A) (Peigneux P);
- 2) mostrano un pregiudizio anticipatorio nella simulazione dello svolgimento dell'azione osservata (Gangitano M) (Borrioni P).

La simulazione anticipatoria è particolarmente evidente durante l'elaborazione di azioni implicite in cui la facilitazione motoria muscolo-specifica è massima per immagini statiche che raffigurano un'azione nella fase iniziale ed intermedia (che corrispondono all'iniziale coinvolgimento muscolare durante l'esecuzione reale dell'azione), e ridotta per la postura finale (corrispondente al massimo coinvolgimento muscolare durante l'esecuzione) (M. V. Urgesi C) (M. M. Urgesi C).

Questi risultati indicano che la facilitazione motoria è massima durante l'estrapolazione di informazioni dinamiche sulle future fasi d'azione e suggeriscono che M1 è attivata preferenzialmente dai circuiti neuronali della simulazione anticipatoria per le fasi di azione imminenti. In accordo con ciò, diversi studi hanno mostrato un aumento dell'ampiezza dei MEPs, osservando immagini statiche di una presa costante, registrati nel muscolo che viene reclutato durante la stessa azione (Fadiga L) (B. N. Avenanti A) (M. M. Urgesi C).

Lo studio di Avenanti del 2013 (Avenanti A.), inoltre, dimostra chiaramente che durante l'osservazione di stimoli statici (cascata ghiacciata) o di movimenti impliciti (cascata) non corporei (umani) non è presente alcuna modulazione motoria nonostante sia stata registrata una possibile comparazione del moto implicito per gli stimoli di mani e non corporei.

Questi risultati suggeriscono come il sistema motorio non rifletta una risposta non specifica durante la percezione di un'azione implicita nella scena (un'entità non umana), bensì l'estrapolazione di informazioni dinamiche da immagini statiche che implicano continue azioni del corpo umano.

Nelle scimmie l'attività corticospinale è modulata attraverso connessioni cortico-corticali indirette (Shimazu H) e corticospinali dirette (Dum RP) (Kraskov A). Negli umani l'IFC svolge un ruolo funzionale per l'attività di M1 durante la preparazione e l'esecuzione dell'azione (Uozumi T) (Davare M); inoltre durante la presa di "precisione" con la mano l'IFC invia informazioni specifiche dei muscoli ad M1 (Davare M) (Cattaneo L). Quindi, durante la simulazione motoria occulta potrebbero esserci interazioni neurali cortico-corticali simili (M.-P. I. Avenanti A) (V. V. Koch G) (Catmur C) (Fadiga L) (Fourkas AD).

Vale la pena notare anche che l'osservazione, l'imitazione e l'esecuzione dell'azione determinano un'attivazione sequenziale di IFC e M1 comparabile (A. S. Nishitani N) (H. R. Nishitani N).

Lesioni reali (Fazio P)⁹ (Pazzaglia M) (Moro V) (Saygin.) o virtuali (H. A. Pobric G) (C. M. Urgesi C) (Tidoni E) dell' IFC hanno dimostrato un'interruzione dell'azione di riconoscimento (U. C. Avenanti A) ed imitazione (Uozumi T), evidenziando il ruolo critico del nodo frontale dell'AON nella rappresentazione interna delle azioni osservate.

Nonostante siano evidenti le prove che indicano un chiaro ruolo nella percezione motoria visiva e nell'imitazione, gli studi sopracitati non chiariscono l'influenza funzionale specifica nella mappatura motoria di azioni implicite.

Lo studio di Avenanti del 2013 (A. L. Avenanti A), sulla base dell'attivazione di IFC e di M1 tramite l'osservazione di un'azione implicita (H. R. Nishitani N) (Johnson-Frey SH) (Proverbio AM), applicando rTMS a bassa frequenza nella IFC e testando qualsiasi

modulazione della reattività motoria corticospinale a stimoli d'azione impliciti, ha rivelato una facilitazione motoria durante l'osservazione di immagini statiche dell'azione di movimento della mano e l'informazione è stata abolita da rTMS su IFC. Inoltre, dopo IFC-rTMS, la risposta motoria alle azioni implicite non era correlata alla sensazione di percezione del movimento, implicata in questi stimoli. La mancanza di modulazione dei MEP dopo la soppressione di IFC dimostra come l'attività del nodo frontale dell'AON sia cruciale per la codifica degli stimoli d'azione impliciti nel sistema motorio dell'osservatore. Questo studio integra ed amplia i risultati della letteratura precedente mostrando che l'IFC è coinvolto selettivamente nella discriminazione visiva dinamica biologica (H. A. Pobric G) (Tidoni E) (Saygin.) di azioni implicite (C. M. Urgesi C) (Moro V) ed indica che il nodo anteriore dell' AON svolge un ruolo chiave, nella codifica visuomotoria di base dell'azione, estrapolando informazioni dalle posizioni statiche del corpo. È probabile che ulteriori aree neurali integrino la percezione dell'azione con l'esecuzione (ad es., le regioni parietali) e che possano inoltre partecipare alla previsione stessa dell'azione. In questo studio, inoltre, la soppressione di IFC ma non di STS aveva indotto una generale riduzione dell'ampiezza dei MEP dei muscoli della mano esaminata dimostrando quindi che l'IFC (e non l'STS) contiene una rappresentazione motoria della mano funzionalmente collegata a M1 (L. G. Rizzolatti G) (Uozumi T) (Davare M). Questi risultati sostengono teorie secondo cui l'inibizione delle rappresentazioni della mano, nelle regioni premotorie, riduca l'eccitabilità corticospinale della mano (Gerschlager W) (O'Shea J) oltre a stabilire una connettività funzionale facilitata tra IFC e M1 (Shimazu H) (F. K. Kilner JM) (B. N. Avenanti A). L'interruzione della simulazione dell'azione osservata dopo IFC-rTMS è tuttavia improbabile che sia causato dall'effetto inibitorio indiretto di IFC-rTMS sull'attività di M1.

In conclusione, questi risultati forniscono prove di causalità diretta che dimostrano come la simulazione dell'azione ed i meccanismi di M1 riflettano passivamente i calcoli effettuati dall'AON ed in particolare nel suo nodo frontale (Fadiga L) (B. N. Avenanti A) (A. A. Schutz-Bosbach S).

Ruolo della corteccia orbito-frontale: apprendimento per errore

L'apprendimento è un fenomeno cognitivo di interazione tra molteplici fattori quali, ad esempio, l'esperienza, il contesto psicologico, sociale ed ambientale. L'apprendimento necessita di lavorare sul limite delle potenzialità di miglioramento concesse in quel determinato periodo spazio-temporale per il soggetto. L'apprendimento, specialmente quello motorio, è inesorabilmente collegato all'esperienza dell'errore infatti Adams nel 1971 affermava come l'errore del movimento fosse il mezzo stesso per arrivare al movimento corretto. Una prima corrente di pensiero dava valore all'apprendimento senza commettere errori e nel 1972 Rushall e Siedentop ritenevano che questo tipo di apprendimento potesse rafforzare positivamente il comportamento corretto e, talvolta, cercando di eliminarlo il prima possibile durante la pratica in quanto avrebbe migliorato la motivazione o l'autoefficacia (Simek e O'Brien, 1982). Adams, Fitts, Gentile ed al. sostenevano che un precoce apprendimento senza errori potesse rafforzare le competenze e che queste potessero resistere meglio alle pressioni. L'apprendimento senza errori è risultato, infine, il miglior metodo di riabilitazione cognitiva per la compromissione della memoria (Hadj-Bouziane F) ma non il migliore per l'apprendimento del gesto motorio. Salmoni et al. nel 1984, invece, dimostrarono come un approccio di questo genere (guidare la persona che deve imparare nell'esecuzione del movimento corretto) fosse nell'immediato utile al miglioramento della performance

ma nel lungo termine colpevole di una riduzione dell'apprendimento di quel task motorio. Al contrario diminuire la guida con feedback portava, durante l'allenamento, ad un incremento della produzione di errori ma nello stesso tempo ad un vantaggio nell'apprendimento. Lee et al. nel 2015 hanno affermato che produrre semplicemente una grande quantità di errori non significava raggiungere una condizione di miglior apprendimento dato che è la natura e la qualità degli errori commessi che la influenzano. Altri studi, invece, hanno notato come l'aumento della quantità di errori portava a risultati migliori nei soggetti meglio qualificati nell'ambito di quel compito, ritenendo utile un incremento degli errori in relazione al livello di abilità dei soggetti (Marchal-Crespo L) e che gli errori che venivano corretti più rapidamente erano quelli che venivano commessi con eccessiva sicurezza (Metcalf). Osservare gli errori altrui è risultato utile al fine di facilitare l'acquisizione delle sequenze motorie corrette. (W. D. Black CB).

La corteccia orbito-frontale e le regioni motorie supplementari hanno riportato un'attivazione neurale sia per quanto riguarda gli errori osservati sia per gli errori commessi in prima persona, mentre il cingolo ventrale, antero-rostrale e la corteccia parietale sono stati attivati esclusivamente durante l'osservazione degli errori altrui (Shane MS).

La corteccia prefrontale mediale (MPFC), invece, ha un ruolo di attivazione sia nell'osservazione degli errori altrui sia nell'esecuzione di errori ed è implicato nel rilevamento dell'incongruenza tra l'aspettativa dell'azione e il movimento effettivo che si verifica (D. E. Desmet C). Il cervello, dunque, elabora le informazioni interiorizzate precedentemente per svolgere un'azione predittiva continua per gli eventi futuri al fine di ridurre l'incertezza sensoriale formulando dinamicamente, in maniera continua, ipotesi percettive (Donnarumma).

L'osservazione di un errore innesca questo sistema di verifica della performance attesa indipendentemente dalla frequenza degli errori proposti screditando, quindi, una possibile correlazione con l'attivazione di questi circuiti per il solo verificarsi di azioni considerate "rare" (N. V. Pezzetta R).

CAPITOLO 2.

Stimolazione cerebrale non invasiva

La neuroplasticità

Il termine plasticità è stato usato nelle neuroscienze per più di un secolo per riferirsi a cambiamenti nell'organizzazione neurale che possano spiegare varie forme di modificabilità comportamentale, sia di breve durata che non, compresa la maturazione, l'adattamento a un ambiente mutevole, specificità e non specificità di vari tipi di apprendimento e meccanismi di compensazione in risposta a perdite funzionali da invecchiamento e danno cerebrale (Konorski) (Vital-Durand F.) (Pathologique) (Buchtel). I ricercatori hanno virtualmente applicato il concetto a qualsiasi tipo di cambiamento nel sistema nervoso. In letteratura sono molteplici le definizioni accostate alla plasticità neurale (Zilles) (Yuste R) (Johansson) (A. A. Pascual-Leone A) (Cooke SF) (Moller) (Ansermet) (Mercado) e al giorno d'oggi la modificabilità nella trasmissione sinaptica tra neuroni è tendenzialmente considerata come il meccanismo principale, se non esclusivo, per la modifica comportamentale.

Già Williams James nel 1890 nel suo "Principles of Psychology" (James.) fu geniale nel trovare una correlazione tra le proprietà della plasticità cerebrale e le abitudini comportamentali introducendo il concetto secondo cui i circuiti cerebrali si rinforzassero "per uso ripetuto". Infatti, egli affermò: *"plasticità, nel senso ampio del termine significa possesso di una struttura abbastanza debole da poter essere influenzata ma abbastanza forte da non cedere a tutte le influenze."* (James.)

Solo pochi anni dopo il neuropsichiatra italiano Tanzi ipotizzò che i processi di memoria e l'apprendimento di abilità motoria potessero dipendere da una facilitazione a livello

della trasmissione sinaptica. Tanzi studio le teorie dei neuroni proposte da Cajal in cui il sistema nervoso era concepito come un raggruppamento di neuroni separati da piccole distanze, ed ipotizzò che le onde di eccitazione nervosa non erano in grado di propagarsi liberamente ma incontravano alcune limitazioni attraversando questi spazi (fessure sinaptiche). Tanzi inoltre pensò che l'attivazione ripetitiva di un circuito neuronale, durante uno specifico apprendimento o pratica, avrebbe potuto causare un'ipertrofia dei neuroni associati lungo quel percorso riducendo la distanza interneuronale e rendendo il passaggio dello stimolo più facile (Tanzi) .

Attualmente la neuroplasticità viene definita come la proprietà di alcune aree corticali di modificare la propria struttura e le funzioni ad essa associate, a seguito di condizionamenti ambientali, nutrizionali, meccanismi di apprendimento motorio, apprendimento del linguaggio, interazioni con altri esseri umani, ma anche a particolari condizioni come l'assunzione di sostanze psicoattive, situazioni di stress psicofisico e condizione del microbioma intestinale (G. R. Kolb B.) (H. A. Kolb B.). Il tessuto nervoso, quindi, modifica continuamente la sua struttura e la sua funzionalità in base all'esperienza. Questi meccanismi di plasticità neurale intervengono anche a seguito di danni cerebrali e sono alla base dei processi di recupero funzionale. Il tessuto nervoso non possiede capacità di recupero anatomo-funzionale post lesionale simile agli altri tessuti (essendo di tipo "perenne", con una scarsa attività riparativa), e in un soggetto adulto questo è organizzato in modo da garantire il miglioramento delle funzioni danneggiate conseguentemente ad una lesione.

Le fasi della plasticità sinaptica sono:

- "*sprouting dendritico*", che consiste nell'arborizzazione dei neuroni adiacenti;

- "*rigenerazione assonale*", cioè la parziale o totale ricrescita degli assoni dei neuroni danneggiati (relativamente facile da ottenersi in soggetti particolarmente giovani, più raramente in soggetti adulti);
- "*supersensibilità postsinaptica*", una situazione in cui aumenta l'accuratezza della trasmissione nervosa e si affina la selettività di trasmissione;
- "*svelamento di sinapsi latenti*", che consiste nell'attivazione di sinapsi da sempre esistite, ma fino ad allora inutilizzate;

Il recupero dopo una lesione è suddivisibile empiricamente in due fasi: la prima ("recupero spontaneo") correlata alla capacità intrinseca di rigenerazione del tessuto, la seconda dipendente dal trattamento riabilitativo che influenza i meccanismi di riarrangiamento neuroplastico.

Recupero spontaneo. La teoria più accreditata è quella che attribuisce il recupero al ripristino di aree remote connesse strutturalmente alla regione cerebrale primariamente danneggiata che, in seguito al danno, andrebbero incontro ad uno status di ridotto metabolismo, ipoperfusione e danno infiammatorio.

Recupero post-riabilitativo. Il recupero avverrebbe mediante modificazioni strutturali: il SNC va incontro a meccanismi di adattamento e riorganizzazione (primo fra tutti la Long Term Potentiation oltre alla Long Term Depression, la sinaptogenesi, ecc.) di regioni limitrofe, spesso distanti dall'area lesionata. Tutto ciò conferma il fatto che il cervello sia capace di sostituire parti danneggiate con altre parti, anche funzionalmente non correlate nello specifico (Slavin MD), in quanto presenti in sovrannumero e deputate unicamente alla sostituzione e riparazione.

La long Term Potentiation LTP

Il termine fu coniato da Tim Bliss che stimolando le fibre perforanti e registrando le risposte sinaptiche a livello dei neuroni del giro dentato dell'ippocampo, si accorse che con stimoli ad alta frequenza (tetanici) si otteneva un aumento duraturo della risposta sinaptica e che questo livello potesse incrementare con l'applicazione di stimoli successivi.

Collingridge e colleghi nel 1993 (Collingridge GL.) scoprirono che, nella zona CA1 dell'ippocampo, l'induzione della LTP richiedeva l'attivazione dei recettori NMDA e successivi studi (Nowak L) dimostrarono che una depolarizzazione post-sinaptica era in grado di rimuovere il blocco indotto dal magnesio. In seguito, è stato provato che l'iniezione di chelanti intracellulari per lo ione calcio, come l'EGTA, bloccava l'induzione del processo suffragando quindi l'ipotesi secondo cui un aumento della concentrazione di calcio fosse uno dei meccanismi fondamentali per l'induzione della LTP.

Aspetti fisiologici della LTP

Se si stimola un neurone e si registra il potenziale sinaptico generato a valle nella cellula bersaglio, si può avere un'indicazione precisa dell'efficienza e della stabilità della trasmissione neurale. A livello di una qualsiasi sinapsi, ad esempio quella neuromuscolare, per stimoli a bassa frequenza (intervalli temporali da qualche secondo in poi), la dimensione media dei potenziali eccitatori postsinaptici (excitatory postsynaptic potential, EPSP) tende a rimanere costante nel tempo. Se invece si applica una stimolazione a frequenza più elevata, si osservano chiare variazioni di ampiezza degli eventi sinaptici, effetto di quella forma di plasticità sinaptica di breve

durata denominata *potenziamento tetanico*. In questo caso la dimensione dell'EPSP cresce e rimane elevata rispetto al livello basale per circa 1-2 minuti.

Nel caso di stimolazioni centrali (ad esempio neuroni ippocampali), le cose variano in maniera significativa: l'applicazione di un singolo stimolo ad alta frequenza (100Hz per 1 secondo), quasi a voler simulare l'arrivo di informazioni dalla corteccia, innesca un incremento delle risposte sinaptiche che rimangono elevate fino alla fine della registrazione; questo fenomeno di neuroplasticità di lunga durata è la LTP. Un evento fisiologico della durata di poche centinaia di millisecondi è, quindi, in grado di causare una modifica neuronale duratura. La LTP rimane quindi il modello più interessante per spiegare tutti quei comportamenti cerebrali che sono condizionati e plasmati dall'esperienza.

Nelle sinapsi ippocampali, ad esempio, la funzione più probabile della LTP è quella di permettere l'apprendimento delle informazioni di tipo non procedurale; se queste, però, vengono potenziate per un tempo equivalente a varie settimane, come è possibile usarle nuovamente per memorizzare altre informazioni? La risposta è la Long Term Depression (LTD).

LTD è solitamente indotta con stimolazioni a frequenza ridotta (2Hz), ma per tempi più prolungati; essa è infatti in grado di resettare il potenziamento neuronale riducendo il volume della trasmissione sinaptica fino ad arrivare ad un livello basale, da cui si può solo risalire evocando la LTP.

Aspetti biochimici

Per indurre un potenziamento a lungo termine è necessario che la membrana post-sinaptica sia depolarizzata nell'intervallo di tempo in cui il terminale presinaptico liberi glutammato. Si può riprodurre in maniera sperimentale la medesima condizione usando la stimolazione tetanica. Il legame con il glutammato apre i canali dei recettori AMPA (in cui passano ioni sodio e potassio), mentre la depolarizzazione che ne consegue fa staccare gli ioni magnesio per repulsione elettrostatica dai recettori NMDA, consentendo il passaggio, oltre al sodio e al potassio, anche agli ioni calcio.

Il calcio è l'elemento chiave del processo perché, una volta raggiunta una determinata concentrazione all'interno della cellula, è in grado di attivare un processo per cui i recettori AMPA presenti vengono trasferiti sulla membrana e i recettori già presenti lasciano passare una maggiore quantità di ioni. La sinapsi risulta così rinforzata. Inoltre, il calcio può attivare un secondo processo capace di creare nuovi recettori AMPA i quali, una volta inseriti all'interno della membrana, modificano permanentemente la forza di connessione. Questo fenomeno assume un'enorme importanza per i neuroni centrali, soprattutto nei neuroni del sistema ippocampale.

Ricapitolando: un evento fisiologico di breve durata è in grado di causare una modificazione sinaptica duratura; dopo la stimolazione tetanica, il neurone bersaglio, rafforzato dalla LTP, è molto più responsivo e produce EPSP (excitatory postsynaptic potential) più ampi per molto tempo. Ricerche condotte su topi hanno mostrato che la LTP nell'ippocampo è effettivamente collegata con la memoria a lungo termine. È inoltre chiaro che, a discrezione della corteccia cerebrale, neuroni modificati con LTP, devono poter essere "resettati" e riportati alle "condizioni di partenza" e questo processo avviene con un'altra forma di plasticità sinaptica: la Long Term Depression, LTD.

La stimolazione cerebrale transcranica

La plasticità è la proprietà del sistema nervoso di modificare la sua funzione e di riorganizzarsi in seguito a cambiamenti ambientali attraverso lo stabilimento di nuove connessioni neurali, l'acquisizione di nuove funzioni e la compensazione di eventuali lesioni (Cramer SC) (Cheeran B). È importante sottolineare che la plasticità non è un evento occasionale del sistema nervoso bensì è uno stato normale-permanente dello stesso e che permane per tutta la durata della vita (T. F. Pascual-Leone A). Come sopra descritto, i cambiamenti adattativi che si verificano durante la plasticità sono stati collegati per lo più al fenomeno di attività-dipendente di rafforzamento della trasmissione sinaptica, chiamato Potenziamento a Lungo Termine (LTP (Dimyan MA)). Invece, la plasticità disadattativa corrisponde alla riduzione della capacità comportamentale e potrebbe coinvolgere la riduzione della forza delle sinapsi chiamate depressione a lungo termine LTD (Cohen LG).

Negli ultimi anni, un crescente interesse è stato diretto verso la valutazione e la modifica di plasticità nella corteccia cerebrale ottenuta con mezzi di tecniche di stimolazione cerebrale non invasiva (NIBS).

La capacità di indurre la neuroplasticità tramite tecniche di stimolazione cerebrale non invasiva (NIBS) ha fornito nuove e interessanti opportunità per indagare le funzioni della corteccia cerebrale, durante una serie di comportamenti o azioni proprie dell'essere umano. Inoltre, l'induzione di cambiamenti duraturi nell'eccitabilità corticale potrebbe, in alcuni casi, modificare il comportamento e andare ad interagire con il normale apprendimento di schemi motori o informazioni cognitive (Chisari C). Le NIBS sono tecniche già sperimentate e utilizzate nello scorso secolo al fine di studiare l'organizzazione anatomo-funzionale dell'encefalo. I primi importanti contributi sono

risultanti dagli studi di Frisch (1838-1927) e Hitzig (1838-1907), Ferrier (1843-1928), Sherrington (1856-1952) e Penfield (1976-1991).

Nel 1980 Merton e Morton (Merton PA) utilizzarono la TES, una stimolazione transcranica elettrica a medio voltaggio attraverso la teca cranica integra, in un paziente non anestetizzato. I risultati furono deludenti a causa del fastidio causato al paziente.

Un metodo ben più utilizzato fu quello ideato da Barker e collaboratori solo cinque anni dopo, chiamato stimolazione magnetica transcranica (TMS), metodologia nella quale si induce una corrente elettrica nell'encefalo tramite un campo magnetico passante per la teca cranica; questa fu la prima NIBS largamente usata in quanto completamente indolore (Barker AT).

Negli anni ulteriori tecniche di stimolazione sono state sviluppate ma quella che ha riscosso più successo nella comunità scientifica è stata la tDCS, ovvero una stimolazione elettrica transcranica che, diversamente dalla TES, si serve di correnti costantemente applicate per un lungo periodo di tempo (nell'ordine dei minuti), ad intensità molto minore, al fine di evitare il dolore e capace di indurre cambiamenti persistenti di tipo neuroplastico anche dopo la stimolazione, per un periodo descritto proporzionale al tempo di stimolazione e che può raggiungere le due ore.

La stimolazione transcranica a corrente diretta (tDCS)

La stimolazione elettrica transcranica (tES) è una tecnica non invasiva di stimolazione cerebrale che consiste in un passaggio di corrente elettrica attraverso la corteccia cerebrale al fine di alterare la funzione cerebrale. Paragonata con la stimolazione magnetica transcranica, la tDCS è una metodica molto più semplice a livello

procedurale e richiede attrezzature più economiche: la parte meccanica più importante è un generatore di corrente capace di un output costante di 1-2 mA.

Modificando l'attività delle regioni cerebrali interessate, i ricercatori possono osservare i cambiamenti comportamentali risultanti e quindi stabilire un collegamento causale. La corrente elettrica viene applicata a un individuo direttamente sul cuoio capelluto, solitamente attraverso due o più elettrodi, e almeno uno di essi deve essere posizionato sul capo con delle cinghie elastiche non conduttive. Mentre una grande quantità di corrente viene condotta tra gli elettrodi attraverso i tessuti molli e il cranio (Voroslakos M), una parte della corrente penetra nel cuoio capelluto ed è condotta attraverso il parenchima cerebrale dove può alterare l'eccitabilità del neurone. Sebbene la dimensione dell'elettrodo più comune utilizzata sia di 20- 35 cm² (Moreno-Duarte I), anche questa può essere modificata per soddisfare le esigenze del ricercatore, infatti con lo sviluppo recente della stimolazione ad alta definizione, che utilizza un insieme di elettrodi più piccoli, si può ottenere un'area di stimolazione più focalizzata. Il posizionamento preciso degli elettrodi è normalmente derivato dall'elettroencefalografia internazionale (EEG) sistema 10-20 (Woods AJ).

Secondo il protocollo di studio descritto in questo lavoro, la corrente è trasmessa tramite due elettrodi, inseriti in due spugne di dimensione di 5x7 cm imbevute di soluzione fisiologica: il primo posto a livello dello scalpo del paziente, in corrispondenza dell'area da stimolare (anodo: elettrodo attivo), il secondo (catodo: elettrodo di riferimento) sulla spalla controlaterale anche se la disposizione può essere differente (catodo o anodo a seconda dell'area da stimolare con l'altro polo posto in corrispondenza della corteccia controlaterale, sull'orbita, sul braccio o comunque in posizione extracefalica).

Come già accennato, la tDCS utilizza una corrente continua erogata a bassa intensità (ad es. 0,5-2 mA) attraverso uno o più elettrodi attivi (anodo). Questa corrente quindi si propaga attraverso la testa e viene restituita tramite l'elettrodo di riferimento (catodo) (Figura 6). Questo flusso a senso unico di elettricità modula in modo affidabile l'eccitabilità corticale (Nitsche MA.), la quale solitamente aumenta a livello dell' anodo (Boros K) e decresce all' elettrodo catodico (Ardolino G). Questo fenomeno è stato chiaramente dimostrato utilizzando una tDCS anodica sulla corteccia motoria per aumentare l'ampiezza dei potenziali motori evocati (MEPs) e tDCS catodica per ridurre l'ampiezza dei MEPs (Paulus).

È importante sottolineare che il campo elettrico a bassa intensità generato dalla tDCS è al di sotto della soglia neuronale il che significa che è capace di modificare potenziali transmembrana neuronali e modulanti l'eccitabilità, portando così i neuroni sottostanti più vicino alla loro soglia di scarica senza provocare la depolarizzazione (I. M. Bikson M). Numerosi studi hanno mostrato i meccanismi della tDCS, in particolare, è stato dimostrato che la tDCS agisce diminuendo le concentrazioni di acido γ -aminobutirrico (GABA) (Stagg CJ) (Bachtiar V), aumentando il fattore neurotrofico derivato dal cervello (BDNF) (Fritsch B) e le concentrazioni di glutammato e di glutamina (Hunter MA). Anche i recettori D-aspartato (NMDA) svolgono un ruolo chiave, con entrambi gli effetti a breve e lungo termine di tDCS che non vengono osservati dopo aver bloccato i canali Na^+ o dopo la somministrazione di un antagonista del recettore NMDA (Liebetanz D) (F. K. Nitsche MA).

Generalmente la corrente che si genera è incapace di stimolare in maniera focale un punto ben definito della corteccia (l'area è di circa 20 cm^2): la bassa densità di corrente così distribuita rende questa metodica praticamente priva di effetti collaterali a breve e lungo termine (l'unico effetto collaterale registrato sembra essere un formicolio o una

leggera iperemia nella parte sottostante l'elettrodo, ma anche esso è raro e del tutto transitorio (Paulus, Transcranial direct current stimulation (tDCS).).

Studi sulla corteccia cerebrale dopo a-tDCS (P. W. Nitsche MA) hanno mostrato che durante e dopo la stimolazione è presente un'importante modulazione dell'eccitabilità neurale causata dal tipo di stimolazione:

- la stimolazione catodica produce effetti neuroinibitori di tipo iperpolarizzante;
- la stimolazione anodica produce effetti neuroeccitatori di tipo depolarizzante;

Studi sull'eccitabilità corticale (S. A. Nitsche MA) hanno dimostrato che durante e dopo la stimolazione è presente un'importante modulazione dell'eccitabilità neuronale, dipendente, come sopra specificato, dal tipo di stimolazione.

Gli effetti della tDCS, a breve e lungo termine, sono causati da diversi eventi microscopici: gli effetti a breve termine sono strettamente legati all'effetto immediato della corrente (anodica-iperpolarizzante o catodica-depolarizzante) sulla soglia di eccitabilità dei neuroni stimolati (Bindman LJ), più interessanti invece sono gli effetti a lungo termine. Essi sono causati in primo luogo dalla modulazione del potenziale di membrana a riposo tramite l'azione sui canali ionici che determinano una redistribuzione degli stessi a livello intra ed extra cellulare; rilevante appare inoltre la modulazione dei recettori NMDA, che mimano meccanismi fisiologici propri della plasticità neuronale (LTP, LTD, sinaptogenesi, ecc.) (Liebetanz D).

In conclusione, la tDCS non provoca la scarica dei neuroni a riposo ma la modifica e la influenza, andando ad agire sulle soglie di risposta (Radman T). Nonostante l'ampia varietà di applicazioni della suddetta stimolazione, i risultati hanno dimostrato, tramite il reperto di potenziali motori evocati MEPs, ipsilaterali e controlaterali, che la

stimolazione anodica causa un incremento della risposta motoria nell'emisfero stimolato, mentre la catodica la diminuisce (Rosenkranz K).

È stato inoltre dimostrato come, dopo stimolazione sinistra su M1, rimanga invariata la funzione di reti modulatorie di tipo inibitorio trans-callosali e, al contrario, come questa cambi dopo stimolazione destra M1, rispondendo in maniera minore dopo tDCS catodica e maggiore dopo tDCS anodica (M. F. Quartarone A). Ciò suggerisce che la neuromodulazione sia limitata nonostante il funzionamento minore o maggiore delle reti inibitorie dell'emisfero stimolato (L. N. Quartarone A).

Studi più recenti hanno studiato l'effetto della tDCS sulle funzioni cognitive valutando la risposta dopo la stimolazione di aree corticali prefrontali, solitamente coinvolte in deficit cognitivi (Drevets). Ad esempio, nei pazienti affetti da Malattia di Parkinson è emerso che la stimolazione anodica sulla regione prefrontale sinistra causa un miglioramento nella memoria classificativa e nella working memory (F. R. Boggio PS).

In seguito, altri interessanti lavori (Fecteau S) hanno ipotizzato un miglioramento del deterioramento psichico-comportamentale dopo stimolazione catodica della corteccia prefrontale dorsolaterale (DLPFC) sia destra che sinistra, in patologie sia neurodegenerative (MdP) che psichiatriche (depressione).

Diversi paradigmi di utilizzo delle tecniche non invasive sono stati applicati in vari modi: (C. L. Dayan E) (Dayan E.) (Sandrini M) in protocolli sperimentali come per la valutazione del LTP e LTD (Huang YZ) (S. O. Reis J) (Ziemann U) ma anche per applicazioni terapeutiche, ad esempio nel trattamento di patologie come depressione maggiore, patologie psichiatriche o patologie neurologiche quali l'ictus o la malattia di Parkinson (Chisari C).

La letteratura recente suggerisce che TMS e TDCS potrebbero anche essere utilizzati come possibile coadiuvante tecnico in trattamenti neuroriabilitativi per migliorare il recupero motorio (Liew SL).

Variatione nella stimolazione

Il potenziale di modulare i processi neurofisiologici usando le tecniche di TES è una realtà, ma deve essere fatta attenzione a fattori che influenzano i risultati della stimolazione. In particolare, quando si tratta di stimolazione cerebrale, la variazione tra gli individui è fondamentale, in quanto non solo l'equilibrio ottimale tra l'eccitazione corticale e l'inibizione varia da individuo a individuo (Krause B), ma una grande percentuale di individui non riesce a rispondere completamente alla stimolazione (Lopez-Alonso V). Età (Leach RC), genere (G. T. Russell MJ), composizione del tessuto sotto gli elettrodi stimolanti (G. T. Russell MJ) sono solo esempi di fattori (Krause B) che sono in grado di alterare la densità della corrente di stimolazione o gli effetti comportamentali provocati. Inoltre, i risultati della stimolazione possono essere significativamente modificati da un numero elevato di decisioni metodologiche, incluso il posizionamento degli elettrodi (Moliadze V) e intensità della corrente (Bastani A).

Sicurezza e tollerabilità della tDCS

Una revisione degli effetti avversi associati alla tDCS in più di 33.200 sessioni e 1000 individui ha dimostrato che non ci sono stati effetti avversi gravi (eventi gravi o rilevanti dal punto di vista medico) registrati durante l'utilizzo di TDC (G. P. Bikson M). Moderati effetti avversi, come la bruciatura della pelle a causa del contatto elettrodo-pelle, sono

stati segnalati raramente e lievi effetti collaterali, come irritazione della pelle, mal di testa e affaticamento, sono frequentemente riportati ma sia nella stimolazione attiva che in quella sham (G. P. Bikson M). Quando si utilizzano le tecniche di stimolazione cerebrale elettrica in un ambiente di ricerca o clinico sono di solito adottate precauzioni per prevenire effetti avversi gravi o moderati: la durata (<60 min), l'intensità (<4 mA) della stimolazione, nonché la dimensione e il posizionamento degli elettrodi sono elementi attentamente selezionati per evitare di aumentare la temperatura sotto gli elettrodi per prevenire ustioni cutanee e limitare eventuali irritazioni (Antal A). La pelle viene anche preparata pulendo con alcool o uno scrub leggermente abrasivo per rimuovere lo sporco o gli oli che possono ridurre la conduttività e aumentare la sensazione soggettiva dei soggetti in esami.

Quindi possiamo affermare che l'utilizzo della tDCS è assolutamente sicuro anche se la sua sicurezza per l'uso ripetuto e prolungato in persone in salute deve ancora essere confermata (Wexler) (H. J. Angius L).

Considerazioni etiche

Sebbene esistano prove considerevoli dei benefici della stimolazione cerebrale elettrica non invasiva, in particolare se combinato con i paradigmi dell'addestramento comportamentale (Krause B) (Santaracchi E. BA-K), ci sono ancora una serie di considerazioni etiche che devono essere prese in considerazione. Un'area chiave da esaminare è riferibile ai potenziali cambiamenti

a lungo termine nella funzione corticale e nel comportamento. Poiché gli effetti a lungo termine delle tES non possono sempre essere garantiti, il potenziale per indurre effetti indesiderati a lungo termine nei partecipanti con o senza il pieno consenso informato è

una possibilità reale. Con i costi relativamente minimi coinvolti nell'acquisizione di un dispositivo stimolante, così come la facilità con cui un dispositivo può essere realizzato (Fitz NS), i dispositivi tES possono sempre più facilmente essere applicati dagli utenti alle prime armi, fai-da-te o da appassionati di stimolazione cerebrale. Ciò solleva la preoccupazione che tali dispositivi possano essere provati in gruppi di pazienti vulnerabili come tecnica per il miglioramento cognitivo o motorio senza conoscenza da parte dell'utente dei protocolli di stimolazione ideali e dei possibili effetti collaterali avversi (Cohen Kadosh R) (Maslen H) che non sono da escludere se l'operatore che eroga la stimolazione non è adeguatamente preparato. Inoltre, i parametri di stimolazione potrebbero non essere mantenuti all'interno delle linee guida sulla sicurezza e possono essere identificati siti di stimolazione non idonei, facendo sì che la stimolazione influenzi i diversi aspetti cognitivi e processi molto diversi rispetto a quelli previsti (Fitz NS) (Hamilton R).

tDCS ed applicazione nello sport

La stimolazione transcranica a corrente diretta (transcranial Direct Current Stimulation, tDCS) permette attraverso una corrente continua di bassa intensità erogata da elettrodi posizionati direttamente sul capo una stimolazione non invasiva in grado di determinare variazioni dell'eccitabilità cerebrale, comportando pertanto una maggiore o minore responsività dei neuroni agli stimoli a seconda del tipo di corrente utilizzata. La corrente ha un'intensità che non provoca danni di alcun tipo al sistema nervoso centrale, non determina dolore ed è avvertita a volte come un formicolio sulla cute nell'area di applicazione dell'elettrodo (G. P. Bikson M). La semplicità e il costo contenuto della tecnica, l'assenza di effetti collaterali e la persistenza dei risultati indotti hanno reso la

tDCS una tecnica riabilitativa integrata nel trattamento di disturbi motori, cognitivi e psichiatrici, dal trattamento della depressione maggiore all'utilizzo in soggetti affetti da malattia di Parkinson o con esiti di ictus cerebrali (Chisari C).

L'applicazione della stimolazione transcranica in corrente continua ha avuto negli ultimi anni largo impiego anche al di fuori dei laboratori.

Mentre possiamo affermare che la tDCS può modulare in modo ampio l'attività cerebrale ed è considerata sicura entro certi limiti resta da determinare se può migliorare le prestazioni sportive. Anche se i suoi effetti sono variabili sia nello stesso individuo che tra individui non è irragionevole pensare che la tDCS abbia un potenziale per migliorare il livello esecutivo e fisico nelle performance sportive.

La capacità di ottimizzare il controllo muscolare e massimizzare la velocità, la potenza o la resistenza è di fondamentale importanza nello sport, così come la formazione e la motivazione (Crewther BT). Alla ricerca dell'eccellenza, gli atleti usano già approcci olistici che influenzano direttamente o indirettamente le funzioni cerebrali. Alcuni di questi approcci includono: meditazione e tecniche di visualizzazione (Rich TA), agopuntura (Ahmedov), che può avere effetti centrali (Zhu B), ascolto di musica per ridurre la percezione dello sforzo fisico (Jarraya M) e strumenti psicologici per motivare o sfruttare effetti placebo (Sabino-Carvalho JL). Molti atleti fanno ricorso ad almeno uno di questi strumenti che seppur non avendo solide basi scientifiche, sicuramente sono privi di effetti collaterali. A fronte di tali motivazioni e risultati è cresciuto l'interesse nei confronti di questa metodica anche in medicina dello sport. Negli anni molti autori hanno focalizzato il loro interesse nella valutazione dell'applicazione della tDCS, nella stimolazione di aree motorie (M1 soprattutto), considerando come misure di outcome dati relativi all'apprendimento motorio, all'acquisizione di specifiche abilità uni-manuali

(S. A. Nitsche MA) (Vines BW) (Kuo MF) (Tecchio F) (J. M. Nitsche MA) (Kang EK) (Kantak SS) (Karok S) (Cuypers K) (Zimmerman M) (Amadi U) (Ambrus GG) (Krause V) e motorie (S. H. Reis J) (Schambra HM), (Saucedo Marquez CM) (Waters-Metenier S) (Cantarero G) (F. J. Reis J), (Ciechanski P) e alla destrezza delle dita (Hummel FC) (Kidgell DJ) (Convento S) (Bastani A.) (Galea JM), (con risultati molto incoraggianti da un punto di vista del miglioramento dell'apprendimento motorio, e della destrezza tanto da poter affermare che tali stimolazioni aumentino il beneficio della pratica e la promozione di prestazioni migliori. Altri studi prevedevano l'applicazione della tDCS in aree cerebrali coinvolte nell'attività motoria andando a valutare l'effetto da un punto di vista dell'eventuale miglioramento della resistenza allo sforzo e della forza muscolare (Hazime FA) (Okano AH) (Abdelmoula A) (Tanaka S) (Williams PS) (Krishnan C). Alcuni ricercatori hanno focalizzato la loro attenzione su altri aspetti dell'attività sportiva come la percezione della fatica o del dolore andando a stimolare aree cerebrali che presiedono al controllo di queste sensazioni (P. B. Angius L) (Vitor-Costa M) (Lattari E) (Vaseghi B) (Flood A).

Ad esempio, Okano et al. hanno studiato gli effetti di 20 minuti di TDC con l'anodo posto sulla corteccia temporale sinistra (T3) su ciclisti allenati 208 durante un test in bicicletta valutando come misura di outcome il picco di potenza che risultava essere significativamente migliorato, mentre si riduceva la frequenza cardiaca e la percezione dello sforzo ai carichi di lavoro sub massimali. I benefici prestazionali sono stati almeno parzialmente attribuiti agli effetti della TDC (riduzione del senso di affaticamento).

Angius et al. (P. B. Angius L) allo stesso modo hanno riferito ridotta percezione dello sforzo e maggiore resistenza in 9 ciclisti cui era stata somministrata la stimolazione anodica della corteccia motoria (M1) quando il catodo è stato posizionato sulla spalla controlaterale ma non quando è posizionato sulla regione prefrontale.

In un recente articolo riguardante la stagnazione delle prestazioni atletiche (Ber15), si è messa in discussione la misura in cui le capacità atletiche potrebbero progredire oltre i confini dei limiti fisiologici umani. Gli autori hanno congetturato, tuttavia, che le scoperte tecnologiche potrebbero mitigare i fattori limitanti le prestazioni fisiche. Uno di questi fattori è proprio la percezione dello sforzo, che può essere modulata dalla tDCS applicata sulla corteccia motoria, con conseguente riduzione della percezione e maggiore resistenza (Vitor-Costa M). Inoltre, la fatica non contribuisce solo a ridurre la resistenza muscolare (Williams PS), ma può anche pregiudicare il processo decisionale e i tempi di risposta a specifiche richieste (Ratray B).

Al contrario, Flood et al. (Flood A) hanno notato che utilizzando una stimolazione ad alta definizione sulla corteccia motoria sinistra in 12 soggetti si otteneva una riduzione della percezione del dolore ma non vi erano dati significativi riguardo la resistenza muscolare o nella massima produzione di forza.

Ci sono stati ulteriori dati positivi (Cogiamanian F) (Abdelmoula A) e negativi (Kan B) (Muthalib M) riportati sugli effetti della TDC con l'anodo posto sulla corteccia motoria considerando però gruppi muscolari isolati, come i flessori del gomito. Tuttavia, si deve sottolineare che l'uso di protocolli di stimolazione comunemente applicati per compiti uni-manuali potrebbe rappresentare una semplificazione eccessiva dei processi cerebrali che sottostanno alle prestazioni del compito bimanuale (Debaere F) (Swinnen SP) (Wenderoth N).

Pixa e colleghi nel 2018 (P. B. Pixa NH), hanno preso in oggetto diversi studi che consideravano l'applicazione della tDCS in diverse zone della corteccia cerebrale valutando l'effetto che aveva sulla performance in compiti bimanuali in soggetti sani e patologici. Diverse regioni cerebrali coinvolte nelle prestazioni motorie bimanuali, infatti,

sono accessibili tramite tDCS Tali autori hanno dimostrato che la tDCS ha il potenziale per migliorare le prestazioni motorie bimanuali nei volontari sani e nei pazienti affetti da malattie neurologiche.

Considerati nell'insieme, i dati hanno indicato che M1 era l'area del cervello preferita per l'applicazione della tDCS per modulare le prestazioni bimanuali, in linea con la maggior parte degli studi che si occupano di compiti uni-manuali. Inoltre, è emerso che la corteccia parietale (PC) svolga un ruolo chiave nelle prestazioni bimanuali attraverso l'integrazione multisensoriale, la guida dei movimenti (Battaglia-Mayer A) (Buneo CA), e l'apprendimento (Debaere F). Duque e colleghi hanno infine proposto che il giro temporale superiore destro (STG) sia coinvolto causalmente nel monitoraggio degli obiettivi spazio-temporali bimanuali (Duque J).

È da considerare inoltre che richieste di compiti diversi come il tipo richiesto di azione bimanuale (ad esempio, simmetrica o asimmetrica) per raggiungere un obiettivo specifico, così come l'esperienza individuale (Furuya S), sono probabilmente correlate a modelli di attivazione distinti all'interno della rete motoria delle azioni bimanuali (Puttemans V) (Jantzen KJ) (Duque J) (Whitall J). Poiché complessi compiti bimanuali sono associati all'attivazione cerebrale che si estende verso le aree prefrontale, parietale e temporale (Gross J) (Hardwick RM) (Swinen) (Debaere F), la stimolazione di una particolare area del cervello potrebbe non essere efficace nel modulare le complesse abilità bimanuali. Questa ipotesi si adatta bene all'osservazione che compiti bimanuali più complessi non sono influenzati da tDCS (Vancleef K) (S. F. Pixa NH) (S. F. Pixa NH). Poiché i meccanismi neurali dell'ampia varietà di azioni bimanuali, così come i meccanismi neurofisiologici alla base del TDC, non sono completamente compresi, gli studi futuri devono prendere in considerazione misure neurofisiologiche utilizzando, ad esempio, TMS, elettroencefalogramma (EEG), magnetoencefalografia

(MEG) o spettroscopia funzionale (fNIRS). Ciò è particolarmente importante dal momento che la variabilità intra- e interindividuale nelle risposte al tDCS è suggerita per influenzare fortemente i risultati dello studio (Li LM).

In conclusione, dalla review di Pixa e colleghi, nonostante l'esiguo numero di studi presenti l'eterogeneità dei protocolli di stimolazione e i diversi progetti di studio sembra evidente che la tDCS ha il potenziale per migliorare le prestazioni motorie bimanuali nei volontari sani e nei pazienti affetti da una varietà di malattie neurologiche. Ulteriore spunto dallo studio di Pixa è rappresentato dal fatto che i dati non consentono l'identificazione di parametri TDC specifici come i più efficaci per modulare le abilità motorie bimanuali e pertanto, la personalizzazione dei protocolli TDC sui compiti bimanuali motori sembra essere la soluzione più idonea.

Ma il gesto sportivo, come noto, non è solo esecuzione di un'azione, ma richiede un'integrazione della comprensione dei gesti degli altri atleti in campo, la corretta percezione dell'ambiente circostante e delle risorse dell'atleta in un preciso istante. Queste abilità sono di natura cognitiva ed al loro controllo presiedono diverse aree cerebrali, dette associative, presenti nei lobi frontali, temporali e parietali. Tra le abilità cognitive cruciali negli sport competitivi e cooperativi vi è la capacità di predire l'outcome di un'azione che sta compiendo un altro giocatore.

Nello specifico della pallavolo il gesto anticipatorio impatta notevolmente sulla performance atletica. La capacità di prevedere l'esatta traiettoria della palla nel minor tempo possibile, ed effettuare uno spostamento funzionale al gesto, è di enorme rilievo per ottenere il miglior risultato in fondamentali quali la ricezione e l'attacco, leggendo in anticipo, ad esempio, la battuta dell'avversario o l'alzata del palleggiatore. Tra le abilità cognitive cruciali negli sport competitivi e cooperativi vi è la capacità di predire

l'outcome di un'azione che sta compiendo un altro giocatore e un'area cerebrale fondamentale nel predire l'esito di un'azione è la corteccia frontale inferiore (P. R. Avenanti A).

Solo due studi hanno preso in considerazione l'applicazione della tDCS sulla corteccia frontale: Clarke et al. (Clark VP) hanno valutato gli effetti della tDCS su un paradigma di apprendimento percettivo (rilevamento di oggetti in un ambiente di combattimento simulato), mostrando un miglioramento significativo della precisione di rilevamento delle minacce con applicazione anodica sulla corteccia frontale inferiore destra.

Allo stesso modo, Borducchi et al. (G. J. Borducchi DM), hanno rilevato che gli atleti d'élite hanno guadagnato un potenziale vantaggio competitivo nelle prestazioni cognitive e elevazione del tono dell'umore, con 2 mA di tDCS con anodo posto sulla corteccia prefrontale dorsolaterale sinistra.

Ma la sfida maggiore per i ricercatori è determinare l'efficacia della TDC nelle prestazioni sportive nel mondo reale e valutarne l'efficacia e la sicurezza nel contesto di un uso ripetuto. Un'ulteriore sfida per le autorità sportive è determinare come la tDCS si potrebbe integrare nel quadro normativo ai livelli di élite. Nel frattempo, sembra probabile che la TDC continui ad essere esplorata dagli atleti competitivi che cercano di oltrepassare i propri limiti.

Training cognitivo ed applicazione nello sport

L'abilità percettivo-cognitiva si riferisce alla capacità di un soggetto di individuare, identificare ed elaborare le informazioni ambientali in modo da integrarle con le conoscenze esistenti e le attuali capacità motorie al fine di selezionare ed eseguire le azioni appropriate (Marteniuk). Queste competenze alla base delle prestazioni includono, tra l'altro, un uso più efficiente ed efficace della visione per osservare in maniera attenta e veloce l'ambiente per estrapolare informazioni di nostro interesse (W. P. Williams AM.).

Inoltre, gli atleti esperti hanno la capacità di individuare, durante l'osservazione, modelli di azione di gioco sport-specifici (North JS.) e di riconoscere segnali d'azione iniziali o successivi in base ai movimenti posturali degli avversari (W. P. Williams AM.).

Queste abilità percettivo-cognitive permettono di regolare e rafforzare sia la capacità di anticipazione sia quella del processo decisionale.

L'anticipazione motoria è la capacità di riconoscere, decodificare e prevedere, nella maniera più precisa possibile, lo sviluppo dell'azione di un altro soggetto (in questo caso di un altro atleta) prima che questa azione venga eseguita.

Il processo decisionale, invece, è l'abilità di pianificare, selezionare ed eseguire un'azione in base alla situazione contingente e alle conoscenze acquisite precedentemente (F. P. Williams AM.).

I ricercatori hanno dimostrato che le abilità cognitivo-percettive possono essere allenate negli sport, tra cui il calcio (Savelsbergh GJP), il badminton (Hagemann N), il tennis (Smeeton NJ) e non sono da escludere ulteriori sport che possono beneficiare di questo tipo di allenamento.

La maggior parte dei ricercatori utilizza compiti rappresentativi, come simulazioni basate su video, per esercitare le abilità cognitivo-percettive; le attività rappresentative, infatti, permettono di ricreare condizioni di situazioni chiave sport-specifiche, che normalmente incontrerebbero solo in ambienti di gioco, al fine di permettere agli atleti esperti una riproduzione standardizzata e ripetibile della loro performance del gesto sportivo specifico (Pinder RA).

Questi compiti dovrebbero consentire ai soggetti di cercare informazioni affidabili nell'ambiente, integrare queste informazioni con le conoscenze esistenti e completare un'azione appropriata; inoltre, dovrebbero consentire agli atleti di sperimentare la ripetizione di situazioni chiave del loro sport ottimizzando il tempo a disposizione rispetto a quanto normalmente sperimenterebbero giocando realmente. Questi compiti rappresentativi sono stati usati in allenamento per osservare le correlazioni dei segnali ambientali e degli avversari (B. L. Williams AM).

Secondo il nostro studio, compiti rappresentativi che esaminano le abilità percettivo-cognitive sono stati spesso associati al paradigma dell'occlusione temporale.

L'occlusione temporale comporta la modifica di immagini video al fine di occludere la visione, in diversi punti temporali, riguardo eventi chiave durante le azioni di un giocatore avversario (Farrow D)

Permette ai ricercatori di dedurre quale regione del corpo fornisce informazioni che non possono essere raccolte altrove, a causa della diminuzione della capacità di previsione che si verifica nel momento in cui tale regione del corpo viene occlusa (D. K. Williams AM.). Tuttavia, ciò non significa necessariamente che la regione del corpo isolata o l'informazione celata sia fondamentale. Può essere la rimozione dell'informazione che distorce o rimuove i relativi passaggi di informazione tra le regioni del corpo. In

alternativa, la rimozione di un segnale critico potrebbe non influire sulle prestazioni, poiché soggetti esperti in un determinato task sono in grado di estrarre comunque informazioni utili da diverse fonti.

Le metodologie di occlusione temporale e spaziale sono state utilizzate per allenare l'anticipazione e il processo decisionale negli atleti.

Ad esempio, al fine di prevedere l'altezza del tiro, gli individui venivano indirizzati verso la posizione del tronco prima del contatto piede-palla, quindi verso la parte iniziale del volo della palla (B. L. Williams AM) .

In conclusione, l'allenamento cognitivo-percettivo fornisce un metodo ideale per sviluppare la capacità di anticipazione e decisionale negli atleti. Sebbene i ricercatori abbiano fatto molti progressi in questo ambito, sono necessarie ulteriori studi per risolvere la domanda chiave su come l'allenamento delle abilità percettivo-cognitive comporti il trasferimento del miglioramento della performance e del suo mantenimento in campo.

Numerosi principi suggeriscono che i compiti rappresentativi utilizzati nella formazione sulle abilità cognitivo-percettive dovrebbero replicare il più possibile il mondo reale per migliorare il trasferimento dell'apprendimento. Questi principi includono la struttura della pratica, l'accoppiamento percezione-azione e le informazioni contestuali che dovrebbero essere al centro della ricerca futura per rispondere alla domanda principale sul trasferimento (W. P. Williams AM.)

La ricerca futura dovrebbe cercare di includere test di trasferimento basati sul campo come norma e, ove possibile, test di trasferimento a lungo termine per ottenere una vera comprensione dei benefici dell'allenamento delle abilità cognitivo-percettive.

CAPITOLO 3 - PARTE SPERIMENTALE

Introduzione

Il successo nello sport dipende dall'eccellenza supportata da diversi fattori: fattori fisici, cognitivi e psicologici risultano importanti per raggiungere l'obiettivo. La preparazione fisica è alla base della maggior parte degli sport ma da sola è insufficiente a garantire una buona riuscita della prestazione atletica desiderata ed è, quindi, necessario che sia accompagnata da un'eccellente coordinazione motoria e da ottime capacità motorie. Sono fondamentali anche caratteristiche psicologiche, come, ad esempio, "la volontà di vincere" ed esistono diverse abilità cognitive che possono contribuire al successo.

A seconda del tipo di sport, abilità cognitive quali le capacità visuo-spaziali e la capacità di anticipazione o previsione del comportamento degli avversari possono fare la differenza in una gara. Quest'ultima abilità, essenziale nella maggior parte degli sport, è stata accuratamente studiata nei tennisti dove è potenziata nei giocatori più esperti e si basa sull'estrazione di informazioni relative alla posizione dei vari segmenti del corpo (Rowe R). Mentre lo scienziato Berthelot (Berthelot G), ha identificato un limite nel miglioramento fisiologico di alcune abilità sportive, che sarebbe impossibile superare senza mezzi esterni, lo scienziato Banissy (Banissy MJ) ha sostenuto la possibilità di avere un possibile miglioramento continuo in termini di prestazione sportiva. Essi hanno anche identificato la chiave del buon risultato nella selezione di individui con caratteristiche precise che a priori erano considerate essenziali per il successo di un determinato sport. Mentre alcuni fattori sono stati chiaramente identificati, molti altri devono ancora essere chiariti e una maggiore consapevolezza delle abilità, essenziali per prestazioni sportive ottimali, porterebbe a risultati migliori. Negli ultimi anni, anche sulla base di campagne antidoping, l'interesse per la medicina sportiva e riabilitativa è

cresciuto in termini di rafforzamento delle capacità atletiche o di recupero da infortuni sportivi attraverso il consolidamento delle capacità cognitive. Tra le capacità cognitive richieste negli sport agonistici e cooperativi, la capacità di prevedere il risultato di un'azione compiuta, ad esempio, da un avversario, è cruciale. L'area del cervello, considerata incaricata di questo compito è la corteccia frontale inferiore (Inferior Frontal Cortex, IFC), come dimostrato dagli studi di Avenanti. (Avenanti A.).

Infatti, Avenanti e collaboratori hanno condotto una serie di esperimenti che hanno dimostrato il ruolo decisivo dell'IFC di sinistra nella previsione dei gesti umani. In uno dei loro studi (P. R. Avenanti A), gli autori hanno utilizzato una stimolazione transcranica a corrente continua (TDCS) per influenzare l'eccitabilità neuronale nelle regioni corticali e registrare l'output cognitivo clinico post-stimolazione. La tDCS è uno dei metodi non invasivi di stimolazione cerebrale (C. C. Koch G), un altro è la stimolazione magnetica transcranica (TMS). La tDCS utilizza una bassa dose (Ampere) di corrente elettrica diretta per modificare la polarizzazione dei neuroni cerebrali corticali, aumentando o diminuendo l'eccitabilità neuronale sulla base della polarità degli elettrodi; ha un basso costo ed è considerata sicura (G. P. Bikson M). Clarke et al. ha mostrato un miglioramento della capacità dei soggetti di identificare possibili minacce in un contesto di combattimento simulato in un videogioco dopo stimolazione della corteccia frontale inferiore destra con un protocollo anodico tDCS (uno stimolo di 30 minuti con una corrente di 2 mA rispetto allo sham) (Clark V P). Borducchi e collaboratori (G. J. Borducchi DM) hanno riscontrato un miglioramento sia cognitivo che dell'umore, stimolando la corteccia prefrontale dorsolaterale sinistra con uno stimolo 20 min/2mA di TDC anodico per dieci giorni feriali. Comunque, nessuno di questi studi considera la stimolazione della corteccia frontale inferiore sinistra rispetto alle prestazioni sportive.

Diversi studi hanno evidenziato l'importanza dei fattori cognitivi nelle conoscenze strategiche e nel processo decisionale nelle competenze sportive (G. R. Vestberg T).

Da una prospettiva cognitiva, le prestazioni più elevate di atleti esperti dipendono in larga misura dalle rappresentazioni mentali interne e dai processi cognitivi che mediano tra l'interpretazione di uno stimolo e la selezione di una risposta (Catteeuw P).

Durante una competizione, l'atleta cerca di comprendere gli elementi strutturali dell'azione di gioco che portano al successo. Questi elementi includono fattori come il punteggio in diretta, gli avversari, la posizione dei membri della squadra, i modelli di gioco offensivo o difensivo, le competizioni passate, ecc. Tutte queste informazioni vengono continuamente aggiornate e archiviate nella memoria dell'atleta, configurando la sua base di conoscenza. Quest'ultima consente al giocatore di interpretare la situazione di gioco e prendere una decisione durante l'azione (Mann DT.). Con l'aumentare delle competenze, nella memoria a lungo termine vengono sviluppati due tipi di strutture della conoscenza (di seguito LTM): il profilo del piano d'azione e l'attuale profilo dell'evento.

Il primo, il profilo del piano d'azione, consente di monitorare le condizioni attuali dell'ambiente (posizione dell'avversario, modello di coordinamento dell'avversario, tendenze dell'avversario, ecc.) al fine di prendere la decisione più accurata possibile; quest'ultimo è definito come copioni tattici più contestualizzati che guidano la costruzione e la modifica continua di elementi significativi da considerare durante l'azione (ad esempio, l'aggiornamento delle informazioni sui punti di forza della squadra avversaria durante una partita). Sono stati costruiti sulla base di gare passate o esperienze precedenti. Entrambe le strutture di conoscenza vengono utilizzate per elaborare informazioni importanti sull'attuale situazione competitiva, pianificare la selezione della risposta e adattare l'esecuzione tecnica durante la competizione. Un

maggior sviluppo di queste strutture di conoscenza consentirà agli atleti di recuperare le informazioni rilevanti per il processo decisionale e il comportamento adattivo durante la competizione (McPherson SL). Data l'importanza delle conoscenze strategiche nei processi cognitivi e la sua relazione con le prestazioni sportive, allenatori e ricercatori hanno sviluppato diversi corsi di formazione cognitiva (M. D. Hopwood M) (E. K. Williams AM) (B. K. Lorains M) (Panchuk D). Per sviluppare capacità tattico-decisionali e cognitive nello sport, gli obiettivi principali sono la promozione e la costruzione di esperienze tattiche. Vickers (Vickers) sviluppa un modello di addestramento decisionale (DTM) e sottolinea l'uso di strumenti come feedback video e domande. (Raab), (Vickers).

Si raccomanda inoltre l'uso del feedback video per analizzare il comportamento tattico (proprio e dell'avversario) durante la competizione, sviluppare profili di situazione, sviluppare conoscenze tattiche negli atleti o migliorare il riconoscimento di fattori contestuali. (Harteis C) Di conseguenza, il feedback video sembra essere uno strumento utile per sviluppare competenze cognitive: ci sono poche prove che la semplice visione dei video sia efficace (Boyer E); sebbene sia consigliato l'aiuto di un esperto (l'allenatore) sull'uso e le modalità di interpretazione al fine di trovare benefici. Infatti, consente di indirizzare l'attenzione dell'atleta verso gli stimoli più rilevanti del contesto di gioco (Vickers JN) (Garcia-Gonzales L).

Alcuni autori hanno focalizzato l'attenzione sulla pallavolo. La pallavolo è uno sport in cui sono necessarie reazioni rapide per seguire l'azione di gioco. Inoltre, la pallavolo è contrassegnata dall'importanza di azioni singole molto rapide, come l'attacco, il muro e anche il servizio (Papadimitriou K) (Afonso J). Tutte le azioni nella pallavolo devono essere eseguite in meno di dieci secondi, con spesso una conclusione di un secondo,

quindi il tempo di reazione, la destrezza e la velocità motoria hanno un grande effetto sul raggiungimento del punto (Mroczek D).

Inoltre, nella vita di tutti i giorni, mentre interagiamo con gli altri, deduciamo continuamente le loro intenzioni attraverso una combinazione di elaborazione bottom-up e top-down particolarmente sensibile agli obiettivi dell'azione. Pertanto, il rilevamento rapido ed efficace degli errori d'azione è fondamentale per avere un adattamento flessibile al comportamento degli altri e fornisce un supporto essenziale per l'apprendimento sociale. La letteratura sull'osservazione dell'errore d'azione ha individuato diverse regioni del cervello che possono essere attive durante l'osservazione dell'errore. In particolare, diverse parti della corteccia prefrontale mediale sono attive durante l'osservazione di azioni insolite a seconda che il comportamento osservato sia intenzionale o meno (B. M. Desmet C). Secondo questo punto di vista, i segnali di azione degli altri vengono confrontati con i modelli interni memorizzati, per la stessa azione, per rilevare deviazioni significative (Wolpert DM.). Il classico Action Observation Network (AON) suggerisce una corrispondenza diretta tra osservatore e attore (C. L.-D. Rizzolatti G) in quanto l'osservazione di un errore dovrebbe attivare gli stessi meccanismi in gioco durante l'esecuzione dell'errore (Dayan E.).

In conclusione, le ipotesi di codifica predittiva suggeriscono che il sistema motorio calcoli la differenza tra le informazioni relative all'azione previste e quelle osservate e quindi gli errori dovrebbero attivare l'AON in misura maggiore (Kilner JM.). Tuttavia, mentre alcuni studi hanno dimostrato una maggiore facilitazione nell'AON quando si osservano azioni errate (S. L. Candidi M) impossibili o non comuni (Stapel JC), altri lavori mostrano una maggiore attività nell'AON durante l'osservazione dell'azione corretta (Shimada S).

Sulla base dei precedenti risultati pubblicati abbiamo ipotizzato che i giocatori di pallavolo possano migliorare il gesto motorio specifico con la stimolazione della corteccia frontale inferiore e con un allenamento video in cui osservano gesti specifici con errori. A nostra conoscenza, non ci sono lavori pubblicati su questi argomenti, nella letteratura scientifica.

Obiettivi

L'obiettivo di questo studio è di valutare l'effetto della tDCS, con funzione eccitatoria applicata alla corteccia frontale inferiore dell'emisfero cerebrale sinistro, sulle prestazioni motorie e di confrontare il suo effetto rispetto a una sessione di allenamento video a casa basata sull'osservazione dell'azione (AO) del gesto errato. L'obiettivo secondario è analizzare l'effetto dei trattamenti sulle funzioni cognitive (previsione dell'azione umana, capacità esecutive e visuo-spaziali) e studiare la correlazione tra le prestazioni motorie e il profilo psicologico e comportamentale degli atleti.

Metodi

Disegno dello studio

Il disegno dello studio è di tipo crossover a tre bracci in doppio cieco. Per escludere l'effetto carry-over, stabiliamo un periodo di wash-out di 2-3 settimane tra i trattamenti. Il flusso di soggetti attraverso lo studio (dall'iscrizione all'allocazione dell'intervento, valutazione e analisi dei dati) è mostrato nella Figura 7. I partecipanti sono stati sottoposti ad una tDCS attiva ed una fittizia (sham), senza sapere quando l'una o l'altra.

I valutatori del risultato e gli analisti dei dati sono stati all'oscuro dell'assegnazione del gruppo fino all'analisi statistica.

Partecipanti

Criteria di eleggibilità

Giocatori di pallavolo destrimani (Lega Volley B, Serie C e Serie D) di età compresa tra 18 e 40 anni con almeno 5 anni di allenamento continuo. I soggetti sono stati esclusi se presentavano: una storia di gravi traumi o una forma fisica non adeguata alla stagione in corso, valutata con esame fisico dal medico di medicina dello sport. I partecipanti sono stati sottoposti a screening per eventuali controindicazioni generali alla stimolazione cerebrale non invasiva (Brunoni AR). Tutti i partecipanti hanno ricevuto una spiegazione verbale delle procedure sperimentali e hanno dato il loro consenso informato scritto prima di partecipare allo studio. Lo studio è conforme al protocollo di Helsinki per gli studi clinici.

Setting

Gli esperimenti con la tDCS e tutta la valutazione sono stati eseguiti presso il Palasport in Via Bagacciano, Camerano 60021, (AN). I corsi di formazione basati su video sono stati completati a casa.

Intervento

Stimolazione transcranica a corrente continua (tDCS)

Ogni soggetto ha svolto due sessioni di stimolazione, tDCS anodico (a-tDCS) e tDCS sham (s-tDCS) in ordine casuale. La tDCS è stata applicata utilizzando uno stimolatore a corrente continua Eldith a batteria (neuroConn GmbH, Ilmenau, Germania). In entrambe le sessioni l'anodo è stato applicato sulla corteccia frontale inferiore sinistra (IFC) e l'elettrodo di riferimento è stato posizionato sul muscolo deltoide controlaterale. La tDCS attiva è stata erogata con una corrente costante di 2 mA per 20 minuti con una dissolvenza in entrata di 20 secondi e una dissolvenza in uscita di 40 secondi. Per sham tDCS, l'intensità è stata impostata su 1 mA, la corrente è stata attivata per soli 30 secondi all'inizio della sessione, con dissolvenza in entrata/uscita di 20 secondi, in modo che i partecipanti abbiano inizialmente sperimentato le sensazioni associate all'insorgenza della stimolazione (lieve formicolio locale). Le posizioni degli elettrodi sono state identificate in base al sistema EEG 10-20 internazionale di posizionamento degli elettrodi, quindi l'anodo è posizionato sul cuoio capelluto a livello di F5.

Training video a casa

Ai partecipanti è stato chiesto di guardare ogni giorno un video di 20 minuti (per 8 giorni consecutivi) che consisteva in 150 brevi filmati che mostravano errori dei giocatori di pallavolo nel ricevere la palla durante una partita di campionato. È stata aggiunta una schermata nera di 3 secondi nell'intervallo totale di 5 secondi tra una clip e l'altra. Inoltre, abbiamo chiesto ai partecipanti di rispondere ad alcune domande che apparivano occasionalmente tra un videoclip e l'altro al fine di mantenere alta la

concentrazione. Le risposte non sono state registrate o utilizzate come dati o misura (vedi figura 8,9,10)

Valutazione e misure di outcome

Raccolta dati

Variabili esplicative

Di base, per ogni soggetto, sono stati raccolti i seguenti dati demografici: data di nascita, istruzione, occupazione, comorbilità e durata della pratica sportiva. Inoltre, ogni soggetto è stato testato per uno screening delle condizioni neuropsicologiche e della qualità del sonno mediante Montreal Cognitive Assessment (MoCA), Hamilton Anxiety Rating Scale (HARS), Barratt Impulsivity Scale (BIS), Symptom Checklist-90-R (SCL-90-R), indice di qualità del sonno di Pittsburgh.

Montreal Cognitive Assessment (MoCA): il test è una misura di screening cognitivo utilizzata come strumento per rilevare lievi disturbi cognitivi (lieve deterioramento cognitivo, MCI). Questo test, pubblicato da Nasreddine et al. nel 2005 (Nasreddine ZS), può essere utilizzato sia a fini clinici che di ricerca e valutazione: capacità visuo-spaziale, funzioni esecutive, memoria episodica, attenzione, astrazione, denominazione, orientamento e linguaggio. Ha un punteggio massimo di 30 punti ed è un test facilmente gestibile (richiede un tempo di realizzazione breve, massimo 10/15 minuti). La velocità del test non influisce sulla sua qualità. Il punteggio di cut-off originariamente raccomandato per un soggetto sano è ≥ 26 , ma studi recenti suggeriscono una soglia ≥ 23 per evitare l'inclusione di falsi positivi causati da soggetti anziani e quelli con bassa istruzione che sono altrimenti molto frequenti.

Hamilton Anxiety Rating Scale (HARS): Hamilton Anxiety Rating Scale (HARS) è uno strumento ampiamente utilizzato e validato per misurare la gravità dell'ansia di un soggetto. L'ansia può riferirsi a "uno stato mentale, un impulso, una risposta a una situazione particolare, un tratto di personalità o un disturbo psichiatrico" (McDowell.) È un questionario destinato agli adulti, adolescenti e bambini e richiede circa quindici minuti per l'amministrazione. La scala è composta da 14 items, ciascuno dei quali è valutato con una scala di Likert a 5 livelli, dove 0 indica l'assenza del disturbo e 4 indica la gravità massima. Il punteggio totale viene calcolato sommando i punteggi dei singoli items (Vaccarino AL) e varia da 0 a 56. Un punteggio ≤ 17 indica un lieve stato d'ansia, un punteggio da 18 a 24 indica un'ansia da lieve a moderata e un punteggio tra 25 e 30 indica un'ansia da moderata a grave. La scala ha una sensibilità di 85,7% e una specificità del 63,5% (Kummer A).

Barratt Impulsivity Scale (BIS): è un questionario progettato per valutare la personalità/costrutto comportamentale dell'impulsività. È lo strumento più ampiamente citato per la valutazione dell'impulsività (Matthew S. Stanford). L'attuale versione della Barratt Impulsiveness Scale è composta da 30 elementi raggruppati in 3 domini principali (attenzionale, motorio e non-planning) che a loro volta includono 6 fattori (attenzionale ed instabilità cognitiva per il dominio attenzionale, motorio e perseveranza per il dominio motorio, autocontrollo e complessità cognitiva per il dominio non-planning). I punti sono segnati su una scala a 4 livelli in cui 1 corrisponde ad un comportamento raro o mai accaduto ed un punteggio 4 a un comportamento tenuto sempre o quasi sempre. Sebbene molti manoscritti scientifici riportino solo il punteggio totale, è consigliabile che almeno i punteggi dei domini di secondo ordine siano riportati per connotare meglio le caratteristiche del comportamento impulsivo. Il punteggio totale

è dato dalla somma di tutti i punteggi dei singoli items facendo attenzione all'inversione del punteggio negli elementi contrassegnati con il simbolo dell'asterisco (Stanford MS MC).

Symptom Checklist-90-R (SCL-90-R): è uno dei questionari auto-somministrati più utilizzati per valutare il disagio psicologico, nella pratica clinica e nella ricerca. Viene anche utilizzato per misurare i progressi e gli esiti dei trattamenti psichiatrici e psicologici o per scopi di ricerca (Derogatis LRS). Il testo è composto da 90 items che indagano i disturbi che possono essersi verificati nell'ultima settimana e sono valutati con una scala Likert a 5 livelli da 0 (per niente) a 4 (moltissimo). I risultati sono classificati in dieci dimensioni sintomatologiche di diverso significato: somatizzazione (SOM), ossessione-compulsione (OC), sensibilità interpersonale (INT), depressione (DEP), ansia (ANX), ostilità (HOS), ansia fobica (PHOB), ideazione paranoide (PAR), psicoticismo (PSY), disturbi del sonno (SLEEP). In generale, i punteggi medi o più alti sono considerati di interesse. Inoltre, un indice globale (GSI, Global Score Index) viene calcolato come il punteggio medio di tutte le domande con la risposta del test; infine, alcuni considerano il numero assoluto di domande con sintomo, ad es. gli items a cui il soggetto ha assegnato un punteggio di 1 o più. Alcuni items non sembrano appartenere a nessuna dimensione descritta, ma accedono comunque alla valutazione dell'indice globale (GSI). Per ogni scala è necessario calcolare la media delle risposte agli items appartenenti alla singola scala. A questo proposito, il manuale SCL-90-R fornisce una definizione operativa di *caseness*: il valore della misura di screening da adottare come punteggio soglia per identificare un caso positivo. Per SCL-90-R, la regola operativa stabilisce che, se l'intervistato ottiene un punteggio GSI grezzo corrispondente a un punteggio T maggiore o uguale a 63, o se uno dei due punteggi relativi alle dimensioni

primarie corrisponde a un Punteggio T con valore superiore o uguale a 63, allora l'individuo è considerato un caso degno di attenzione clinica o un soggetto a rischio (Derogatis).

Indice di qualità del sonno di Pittsburgh: sviluppato dall'Università di Pittsburgh; è un questionario autoreferenziale che valuta la qualità del sonno in un intervallo di tempo di 1 mese. Il completamento del test richiede 5-10 minuti (Buysse DJ). È composto da 19 items e 7 domini che indagano la qualità soggettiva del sonno, la latenza del sonno (tempo impiegato ad addormentarsi), la durata del sonno, l'efficienza abituale del sonno (la percentuale di tempo trascorso a letto senza dormire), i disturbi del sonno, l'uso di droghe e disfunzioni diurne. Ogni item è ponderato su una scala a 4 livelli, da 0 a 3. Il punteggio globale PSQI viene quindi calcolato sommando i punteggi dei 7 domini, fornendo un punteggio complessivo compreso tra 0 e 21, dove i punteggi più bassi denotano una qualità del sonno migliore.

Misure di outcome primarie

Task motorio: L'attività utilizzata per valutare le prestazioni motorie richiedeva che l'atleta, in posizione "6", ricevesse 30 servizi standardizzati da una "macchina spara-palloni" impostata dall'inizio sia per la velocità che per la traiettoria della palla. Uno scoutman certificato ha analizzato la qualità del gesto di ricezione degli atleti in relazione a un obiettivo definito (canestro di 1,80 m di altezza posizionato nella zona "3" per simulare la posizione dell'alzatore durante la partita). Sono stati assegnati due punti se l'atleta ha colpito il canestro, un punto se la palla ha colpito il ferro del canestro, 0 punti se la palla è caduta a meno di 3 metri dal canestro, un punto è stato sottratto se la

palla è caduta a più di 3 metri dal canestro e 2 i punti venivano sottratti se la palla ricevuta non era giocabile (vedi figura 11).

Misure di outcome secondarie

Task di previsione dell'azione (Action prediction task): al fine di valutare l'effetto del tDCS sulla capacità dei partecipanti di prevedere la traiettoria della palla in relazione a un ipotetico schema motorio del giocatore, ai partecipanti è stato chiesto di guardare 60 video che mostravano un atleta destrimano, che eseguiva un servizio float, dirigere la palla verso la metà opposta del campo a destra o a sinistra. Ogni video è stato interrotto alcuni fotogrammi prima dell'impatto della mano dell'atleta sulla palla. Tra un video e l'altro è stato impostato un intervallo di 3 secondi con la schermata nera.

Ai soggetti è stato chiesto di rispondere con i due pulsanti del mouse, facendo clic a destra o sinistra, nel minor tempo possibile, nella direzione presunta (metà destra o sinistra) solo osservando la preparazione del movimento prima dell'impatto con la palla. Sono stati registrati il tempo di reazione (la latenza tra l'inizio del video e il clic della risposta fornita dal soggetto) e il numero di risposte corrette. La raccolta finale dei 60 video è stata selezionata da un campione iniziale di 110 video in base al grado di accordo (3/3) ottenuto da 3 esperti valutatori (giocatori di pallavolo che non hanno partecipato allo studio). Inoltre, un ingegnere ha programmato un software specifico capace sia di presentare questa serie di video sia di raccogliere la risposta del giocatore. Il programma è stato creato sotto forma di una piattaforma web, la cui funzione principale è sia quella di interfacciarsi con il database sia la gestione dell'interfaccia utente. I tempi di reazione (il tempo in millisecondi dal servizio float

iniziano al pulsante premuto dal partecipante) e l'accuratezza della risposta (numero di risposte corrette) sono state estrapolate ad ogni prova (vedi figura 12).

Lo Stroop Color and Word Test (SCWT) è stato utilizzato per valutare l'effetto degli esperimenti sulla capacità di inibire le interferenze cognitive che si verificano quando l'elaborazione di una specifica funzione di stimolo influenza l'elaborazione simultanea di un secondo attributo di stimolo, noto come Stroop Effetto. Infine, abbiamo usato il test Benton di Judgment of Line Orientation (JLO) per valutare le capacità visuo-spaziali.

Stroop test: Stroop Color and Word Test (SCWT) è un test neuropsicologico standardizzato e validato per la misurazione dell'attenzione divisa sostenuta. Valuta la capacità di inibire l'interferenza cognitiva, che si verifica quando l'elaborazione di una funzione di stimolo influenza l'elaborazione simultanea di un'altra proprietà dello stesso stimolo (Stroop). Nella versione più comune di SCWT, originariamente proposta da Stroop nel 1935, i soggetti sono tenuti a leggere tre diverse tabelle il più rapidamente possibile. Due di queste tabelle rappresentano la "condizione congruente" in cui i partecipanti sono tenuti a leggere i nomi dei colori (chiamati color-words) stampati con inchiostro nero (W) e denominare patch di diversi colori (C). Viceversa, nella terza tabella, chiamata condizione della parola colore (CW), le lettere che compongono la parola di un colore sono stampate in un inchiostro con un colore incoerente (ad esempio, la parola "rosso" è stampata con inchiostro verde). Pertanto, in questa condizione incongruente, i partecipanti sono tenuti a nominare il colore dell'inchiostro invece di leggere la parola. I partecipanti sono tenuti, quindi, a svolgere un'attività meno automatizzata (ad esempio nominare il colore dell'inchiostro) mentre inibiscono l'interferenza derivante da un'attività più automatica (ad esempio, leggere la parola) (MacLeod CM). Questa difficoltà nell'inibire il processo più automatico si chiama effetto Stroop (Stroop). Può anche essere usato per valutare indirettamente altre funzioni

cognitive come attenzione, velocità di elaborazione, flessibilità cognitiva e memoria di lavoro. In letteratura esiste un'ampia variabilità nella valutazione dei punteggi, pertanto sono state proposte formule per integrare le varie variabili presenti (tempo in cui viene eseguito il test, numero di errori, correzioni di errori). In questo studio abbiamo registrato il numero di risposte fornite in 30 secondi, il tempo impiegato per fornire 50 risposte e il numero di errori commessi.

Judgment of Line Orientation (JLO) Benton test: è un test standardizzato che valuta le capacità visuo-spaziali (IGMKA). Il test, progettato da Benton nel 1978 (Benton AL VN), comprende 30 items. Ogni item è composto da 2 linee con angolazioni diverse che sono state estrapolate da un pool di 11 linee numerate da 1 a 11 e disposte a semicerchio con un dislivello di 18° dalla successiva. Al candidato viene chiesto di identificare quale delle linee del semicerchio corrisponde alle due linee selezionate per ciascun item. Il test misura la capacità di una persona di abbinare l'angolo e l'orientamento delle linee nello spazio. Il test è adatto a popolazioni di adulti e bambini. Il test ha due forme, H e J, che presentano gli stessi 30 items ma in ordine diverso. Nel nostro studio abbiamo utilizzato la forma H. Il punteggio complessivo del test è di 60 punti (1 punto assegnato per ogni linea correttamente identificata). Un punteggio di 17 o meno è considerato un segno di grave deficit.

Timing di valutazione

Negli esperimenti con tDCS, le prestazioni delle attività sono state valutate prima e dopo la tDCS attiva o la condizione di controllo tDCS sham, invece, per l'esperimento tramite video, i partecipanti sono stati sottoposti, a tutti i precedenti test, prima e dopo l'allenamento di 8 giorni.

Dimensione del campione

La dimensione del campione è stata determinata attraverso un'analisi della potenza condotta utilizzando G * Power 3 (Faul F), con potenza $(1 - \beta) = 0,80$ e $\alpha = 0,05$, a due code. Ci aspettavamo una grande dimensione dell'effetto (media di Cohen $d = 0,96$) basata su Avenanti et al. (P. R. Avenanti A). L'analisi ha prodotto campioni richiesti di 11 partecipanti. Abbiamo arruolato 16 partecipanti in un disegno di studio cross-over.

Metodi statistici

I dati sono stati descritti in termini di medie, deviazioni standard, mediane, intervallo e IQR per dati sia parametrici che non parametrici.

I dati demografici e clinici sono stati descritti usando la deviazione media e standard per variabili parametriche, mediana, intervallo e intervallo interquartile per variabili continue non parametriche. Il confronto statistico post-test preliminare è stato condotto utilizzando test non parametrici (test di Wilcoxon Signed Rank) per ciascun esperimento (a-tDCS, s-tDCS, allenamento basato su video). Abbiamo usato il test di Friedman per rilevare differenze nei trattamenti nel tempo.

Abbiamo utilizzato l'analisi di regressione per valutare se il modello di risposta motoria e cognitiva dopo a-tDCS e formazione basata su video, è correlato ai dati clinico-demografici e al profilo comportamentale.

Risultati

Dati preliminari

Abbiamo arruolato 16 giocatori di pallavolo destrimani (9 maschi) con un'età media di 25,4 anni, specializzati in ricezione (schiacciatore/libero). (Vedi la Tabella 1 per i dettagli). Nessuno aveva comorbilità o una storia familiare positiva per disturbi neurologici e/o psichiatrici. Non sono stati segnalati o notati disagi o effetti avversi durante la tDCS tranne un leggero formicolio all'inizio della stimolazione. Nessuno ha riportato disturbi del sonno. Il test di screening dei disturbi cognitivi e i test di valutazione del profilo affettivo/comportamentale erano entro i limiti normali. Ci sono stati 4 abbandoni durante l'allenamento video perché hanno dovuto trasferirsi fuori dalla regione per unirsi a una nuova squadra di pallavolo.

Risultati dell'analisi pre- e post-test

Confronto risultati intra-gruppo

Task motorio

Sia la stimolazione anodica dell'IFC sinistro che l'allenamento video hanno migliorato le prestazioni motorie, come dimostrato dal significativo aumento dei punteggi ottenuti nella valutazione della ricezione da parte dello scoutman (a-tDCS: $p = 0,004$, $Z = -3,5$, allenamento video: $p = 0,002$, $Z = -3,06$). Al contrario, non ci sono stati cambiamenti significativi dopo s-tDCS. (vedi figura 13,14)

Action Prediction Task

- Tempo di reazione: i tempi di reazione (i millisecondi dal servizio float iniziano alla pressione del pulsante da parte dei partecipanti) sono notevolmente migliorati dopo un a-tDCS dell'IFC sinistro e un video training. (a-tDCS: $p = 0.002$, $Z = -3.10$, allenamento video: $p = 0.002$, $Z = -3.06$) (vedi Figura 15,16).
- Precisione della risposta: il numero di risposte corrette è migliorato in modo significativo dopo a-tDCS dell'IFC sinistro ed allenamento video (a-tDCS: $p = 0,02$; $Z = -2,32$ allenamento video: $p = 0,035$, $Z = -2.1$) (vedi Figura 17,18)

Nessuna variazione significativa è stata registrata dopo s-tDCS né per quanto riguarda il numero di test corretti né per il tempo di reazione.

Miglioramenti statisticamente significativi sono stati rilevati anche in alcuni dei test di abilità cognitiva. In particolare:

- **JLO BENTON TEST:** dopo a-tDCS e dopo l'allenamento video c'è stato un miglioramento delle capacità visuo-spaziali diversamente da quanto visto dopo s-tDCS (a-tDCS: $p = 0,003$, $Z = -2,95$, allenamento video: $p = 0,01$, $Z = -2.5$) (vedi figure 19, 20).
- **STROOP TEST:** a-tDCS ed allenamento video hanno portato a significativi miglioramenti nel sottotest CWT dello Stroop test.

Gli atleti sono stati in grado di fornire più risposte ai compiti di interferenza cognitiva (a-tDCS - sottotest CWT N: $p = 0,0005$, $Z = -3,46$, allenamento video - sottotest CWT N: $p = 0,002$, $Z = -3,06$) in un tempo più breve (a-tDCS sottotest -

CWT T: $p = 0,0004$, $Z = -3,5$, allenamento video - sottotest CWT T: $p = 0,002$, $Z = -3,06$). Nessun cambiamento significativo è stato trovato dopo s-tDCS (vedi figure 21, 22, 23, 24).

Confronto risultati inter-gruppo

Una differenza statisticamente significativa è stata trovata tra i 3 risultati degli esperimenti per quanto riguarda la variazione dell'esito pre-post nel task motorio (Chi Square: 12.542; Tied P Value: 0,0017); inoltre, l'analisi post-hoc ha mostrato differenze significative tra esperimenti sham/tDCS attiva ($p = 0,004$, $Z = -3,5$) e tra sham tDCS/ test cognitivi ($p = 0,002$, $Z = -3,0$). Nessun significato statistico nel confronto tra tDCS attiva/ esperimenti cognitivi (vedi figura 25).

Una differenza statisticamente significativa è stata trovata tra i 3 esperimenti per quanto riguarda il punteggio nel Benton Test (Chi Square: 12.667; Tied P Value: 0.0006); inoltre, l'analisi post-hoc ha mostrato differenze significative tra esperimenti sham / attivi ($p = 0,006$, $Z = -3,4$) e tra sham / cognitivi ($p = 0,002$, $Z = -3,0$). Nessun significato statistico nel confronto tra esperimenti attivi/ cognitivi (vedi figura 26).

È stata rilevata una differenza statisticamente significativa tra i 3 esperimenti per quanto riguarda il punteggio nel sotto-test CWT relativo al numero di elementi corretti (N) e al tempo di esecuzione (T) (CWT T: Chi Square: 19.042; Tied P Value $< 0,0001$, CWT N: Chi Square: 18.426; Tied P Value $< 0,0001$); inoltre, le analisi post-hoc hanno mostrato differenze significative tra esperimenti sham/ attivi (CWT T: $p = 0,003$, $Z = -3,6$; CWT N: $p < 0,001$, $Z = 4,3$) e tra sham/ cognitivi (CWT T: $p = 0,001$, $Z = -3,8$; CWT N: $p < 0,001$, $Z = 4,3$). Nessun significato statistico nel confronto tra esperimenti attivi/ cognitivi (vedi figure 27, 28).

È stata rilevata una differenza statisticamente significativa tra i 3 esperimenti sia per quanto riguarda la capacità degli atleti di identificare correttamente la direzione della palla in un contesto virtuale (VIDEO N) sia per il miglioramento del tempo di reazione nel fornire la risposta corretta (VIDEO RT): (VIDEO N: Chi Square: 10.167; Tied P Value: 0,0022, VIDEO RT: Chi Square: 12,167; Tied P Value: 0,0023). L'analisi post-hoc ha mostrato differenze significative tra esperimenti sham / attivi (VIDEO N: $p = 0,003$, $Z = -3,6$; VIDEO RT: $p = 0,009$, $Z = -2,6$) e tra sham / cognitivi (VIDEO N: $p = 0,001$, $Z = -3,8$; VIDEO RT: $p < 0,001$, $Z = 3,9$). Nessun significato statistico nel confronto tra esperimenti attivi/ cognitivi.

Analisi di correlazione

Il miglioramento dell'attività motoria dopo a-tDCS è correlato a:

- Diversi tratti della personalità dei soggetti (tratto fobico: $P = 0,009$, $R = 0,4$, tratto ossessivo-compulsivo: $P = 0,01$, $R = 0,39$, tratto depressivo: $P = 0,01$, $R = 0,36$ tratto ostile: $P = 0,03$, $R = 0,3$, tratto paranoico: $P = 0,008$, $R = 0,4$, ansia: $P = 0,01$, $R = 0,38$, psicoticismo: $P = 0,04$, $R = 0,27$; disagio psicologico globale: $P = 0,02$, $R = 0,3$; indice di sofferenza dei sintomi positivi : $P = 0,009$, $R = 0,4$; punteggio totale: $P = 0,02$, $R = 0,3$): maggiore è il punteggio relativo a questi sottogruppi sulla scala SCL-90, maggiore è il punteggio nell'attività motoria dopo a-tDCS
- Livello di impulsività dei soggetti misurati con la scala BIS (in particolare il sottotest COGNITIVO: $p = 0,05$, $R = 0,23$): maggiore è l'impulsività, maggiore è il punteggio nel compito motorio dopo a-tDCS (vedi figure da 31-41).

Il numero di video identificato correttamente (Action Prediction Task) dopo a-tDCS è correlato a:

- Livello di impulsività misurato da BIS TOT ($P = 0,03$, $R = 0,3$) (vedi figura 42)

Il numero di video identificati correttamente (Action Prediction Task) dopo l'allenamento basato su video è correlato a:

- Livello di ansia misurato da HARS: maggiore è il punteggio HARS, maggiore è la risposta corretta durante il test video. ($P = 0,01$, $R = 0,5$) (vedi figura 43)
- Livello di impulsività misurato dalla BRI: maggiore è il punteggio della BRI e dei suoi sottotest (in particolare i sottotest COGNITIVO e NON PLANNING), maggiori sono le risposte corrette durante il test video. (P BIS TOT = $0,03$ $R = 0,4$, P BIS COGN = $0,01$ $R = 0,5$, P BIS NON PLANNING = $0,05$ $R = 0,3$) (vedi figure 44, 45, 46).

Discussione

Numerosi studi in letteratura hanno già dimostrato che la tDCS applicata alla corteccia motoria primaria (M1) degli atleti professionisti è correlata ad un aumento delle prestazioni motorie in diverse attività sportive. Uno studio di Kamali ha mostrato come l'eccitazione simultanea indotta dalla tDCS sull'area M1 e sull'area temporale sinistra possa potenzialmente migliorare le prestazioni atletiche complessive nei bodybuilder esperti (Kamali AM); inoltre, alcuni studi hanno mostrato la relazione tra l'effetto di a-tDCS applicato all'area M1 e il miglioramento del tempo di affaticamento durante la corsa e il ciclismo sub massimale (Vitor-Costa M); tuttavia, l'intervento della tDCS non ha alcun effetto sulle risposte cardiorespiratorie (Park SB). La tDCS anodica (a-tDCS) su M1 può essere correlata alla possibilità di migliorare la funzione e la potenza di un particolare gruppo muscolare (P. B. Angius L), (Hazime FA). Sono stati condotti meno studi con a-tDCS, applicati ad atleti d'élite, su IFC. I neuroni IFC vengono attivati sia durante l'osservazione che l'implementazione di uno specifico compito motorio per predire il futuro corso dell'azione osservata e raggiungere un grado percettivo di stabilità sufficiente per affrontare qualsiasi comprensione ambigua derivata dalla discontinuità dell'input sensoriale (Wilson M).

Successivamente, come notato da un brillante studio di Avenanti, è stato dimostrato che l'aumento dell'eccitabilità, tramite a-tDCS, su IFC è correlato a un miglioramento delle capacità di previsione dell'azione degli altri esseri umani mentre la stimolazione catodica della IFC comprometteva questa capacità (P. R. Avenanti A). Gli stessi autori hanno analizzato anche la funzione del Solco Temporale Superiore (STS) che risulta essere un nodo importante nella codifica visiva dei movimenti biologici umani ma al contrario di IFC non risulta essere coinvolto nell'accoppiamento percezione-esecuzione

di un'azione. Questi dati mostrano che il sistema motorio dell'osservatore genera rappresentazioni anticipatorie delle azioni degli altri individui, proiettando il corso dei movimenti nel futuro. Queste previsioni vengono nei sistemi percettivi (es. STS) di alto livello che creano aspettative le quali vengono confermate o meno dall'evoluzione dell'azione in atto. Il nostro studio, pertanto, ha voluto indagare su come questo stimolo eccitatorio sull'IFC potrebbe portare a un miglioramento della previsione dell'azione in relazione a compiti diversi, in uno sport caratterizzato da gesti sportivi complessi come la pallavolo. I nostri risultati sono in accordo con prove recenti a supporto della codifica predittiva nelle regioni frontali durante l'elaborazione del linguaggio di azione (Garcia AM) e intenzionalità (Koster-Hale J), (Friston KJ), di azioni per le quali la percezione dell'azione sfrutta feedback e feedforward costanti nell'interazione tra regioni visive (STS) e frontali (IFC). In particolare, l'IFC sarebbe coinvolto nella generazione di previsioni sulle azioni osservate (Blakemore SJ). Sulla base degli studi di Avenanti et al, dietro questo risultato può esserci il potenziamento dell'abilità di previsione dell'azione o l'abilità di stimare il risultato di un determinato compito motorio in relazione a un oggetto (una palla, per esempio). Il principale risultato del nostro studio è il miglioramento delle prestazioni atletiche sia dopo la stimolazione eccitatoria con tDCS sulla corteccia frontale inferiore (IFC) sia dopo l'allenamento video basato sull'osservazione dell'azione degli errori nell'esecuzione del gesto atletico. La tDCS anodica ha determinato un miglioramento delle abilità cognitive durante il gesto atletico, infatti i soggetti hanno mostrato una migliore abilità nell'individuare anticipatamente la direzione della palla durante il test di gioco virtuale. Questo risultato indica che la tDCS anodica su IFC è in grado di potenziare l'abilità di Action Prediction, ovvero la capacità di predire lo sviluppo di un'azione dall'inizio. Inoltre, sia la stimolazione con tDCS sia l'allenamento basato sui video ha migliorato la performance del task motorio denotando un incremento della

capacità di pianificazione dell'esecuzione di un'azione imminente. Inoltre, la stimolazione con tDCS anodica su IFC e l'allenamento video hanno determinato un anche un miglioramento delle abilità cognitive, come le capacità visuo-spaziali; infatti gli atleti hanno registrato risultati migliori nel JLO Benton Test, individuando con più precisione le linee con differenti angolazione nei vari items. Dopo la a-tDCS gli atleti hanno mostrato una maggiore capacità di inibizione delle interferenze cognitive aumentando, quindi, il livello di attenzione, la velocità di elaborazione, la flessibilità cognitiva e la memoria di lavoro, come mostrato dai risultati in tutti i sottotest (W, C, WCT) dello Stroop Colour and Word Test (SCWT). Tuttavia, questo metodo di trattamento, sebbene di comprovata efficacia, presenta alcune limitazioni durante lo sport o l'allenamento: ad esempio, richiede la presenza di un team medico specializzato nella somministrazione del trattamento, è difficilmente realizzabile in numerosi team e potrebbe, in futuro, essere assoggettato al controllo etico per impedire che la sua somministrazione venga riconosciuta come un effetto di neuro-doping. In relazione a determinati limiti inerenti alla relazione tra a-tDCS e attività sportiva quotidiana abbiamo deciso di confrontare questo metodo rispetto a un training cognitivo basato sul rilevamento degli errori. Questo tipo di allenamento non crea problemi di tipo etico e potrebbe essere utilizzato a casa, senza controindicazioni, senza controllo medico ed utilizzando dispositivi a basso costo. Inoltre, sarebbe una valida alternativa di allenamento qualora un atleta fosse impossibilitato a partecipare attivamente all'allenamento fisico o alla capacità di sperimentare situazioni particolari del proprio sport in maniera ripetuta (Broadbent DP1). La nostra opinione è che questo allenamento potrebbe essere utile come potenziamento del normale allenamento atletico o come allenamento alternativo svolto a casa, ad esempio, per gli atleti infortunati.

In letteratura l'efficacia dell'allenamento cognitivo basato sulla visualizzazione di immagini è già stata spesso dimostrata: ad esempio, la combinazione di diversi tipi di allenamento cognitivo con le immagini ha mostrato un'influenza positiva sulle prestazioni del calciatore durante l'allenamento, a causa del condizionamento comportamentale ed emotivo (Slimani M), inoltre, è stato evidenziato in vari studi, come l'allenamento cognitivo rappresenti un metodo ottimale finalizzato al miglioramento simultaneo di processi che sono spesso difficili da allenare contemporaneamente come attenzione, sottosistemi anticipatori e memoria (Renshaw I). Al contrario, la letteratura ha un impatto minore sull'allenamento attraverso la visualizzazione di errori nella medicina dello sport, sebbene questo metodo sia confermato efficacemente da alcuni studi di neuropsicologi (W. D. Black CB), (N. V. Pezzetta R). L'osservazione di altri soggetti che svolgono un'attività, e che quindi possono incorrere nell'esecuzione di un errore, è di fondamentale importanza dato che (Newman-Norlund RD) ha confermato quello che già (Badets A, 2006) aveva ipotizzato e cioè che i meccanismi di elaborazione neurale durante l'osservazione di un modello sono probabilmente simili a quelli che si innescano durante la pratica fisica.

Una specifica e precoce riduzione dell'inibizione intracorticale (120 ms) è causata da una significativa discrepanza tra l'outcome di performance atteso e l'azione errata osservata depotenziando, contrariamente a quanto si aspettava, l'inibizione corticale e comportando un aumento dell'attività dell'AON. Inoltre, la cascata neurale che normalmente si innesca con l'osservazione di un'azione sbagliata è la stessa della soppressione volontaria di un movimento sbagliato (Cardellicchio P, 2019).

L'osservazione di altri soggetti che svolgono un'attività, e che quindi possono incorrere nell'esecuzione di un errore, è di fondamentale importanza dato che (Newman-Norlund RD, 2009) hanno confermato quello che già (Badets A, 2006) aveva ipotizzato e cioè

che i meccanismi di elaborazione neurale durante l'osservazione di un modello sono probabilmente simili a quelli che si innescano durante la pratica fisica.

È stato studiato che l'errore motorio produce una traccia, una memoria dell'errore, che perdura per circa 4s, e poi, successivamente, decade. Questa traccia permette un continuo adattamento fino al successivo movimento (Huang VS1, 2007) ed ha una plasticità tale da rafforzarsi qualora il soggetto svolge l'azione correttamente mentre rimane suscettibile a modificazioni ed a correzioni migliorative nel caso in cui il soggetto commette un errore (Metcalfe J1, 2018).

Inoltre, dopo aver commesso un errore, i soggetti tendono a ripetere l'azione più lentamente, poiché si verifica l'interruzione dell'attività neurale con una codifica persistente dell'errore e ad un successivo cambiamento nelle prestazioni comportamentali. Questo fenomeno si chiama "rallentamento post-errore" e consente di avere quel tempo necessario per sviluppare nuove strategie e di aumentare la sensibilità agli errori (Wang L, 2014) (Laubach M, 2015). Pertanto, secondo questi dati, abbiamo confrontato l'effetto dell'allenamento video online basato su errori negli atleti d'élite nella pallavolo rispetto alla tDCS anodica su IFC e abbiamo trovato risultati simili. Inoltre, è ampiamente noto che la tDCS anodica sulla corteccia prefrontale dorsolaterale viene utilizzata con successo come trattamento di disturbi psicologico-cognitivi come: depressione maggiore (Asli Demirtas T); schizofrenia (Hasan A), (Agarwal SM) e ansia (de Lima AL), (Nishida K). In particolare, sono stati riportati alcuni miglioramenti effettivi nel corso di due studi principali (Fregni F), (B. F. Boggio PS) caratterizzati rispettivamente sottoponendo i pazienti a 5 sessioni di tDCS a una corrente da 1 mA, anziché a 10 sessioni di tDCS a 2 mA di corrente, entrambi caratterizzati dal posizionamento dell'anodo tDCS sopra la corteccia prefrontale dorsolaterale; considerando questa stessa area del cervello, come base di processi alla

base di vari sintomi depressivi come un metabolismo ridotto e una neurotrasmissione anormale. L'accettazione di quest'area come quella principalmente coinvolta dipende non solo dalle valutazioni fatte in passato che sono state in grado di dimostrare il suo coinvolgimento nelle malattie neuropsichiatriche, ma anche dal fatto che risulta essere saldamente collegato ad altre regioni da un punto di vista neurale: è coinvolto in un gran numero di funzioni cognitive come attenzione, memoria, velocità, abilità motorie, cognizione sociale, ecc. In soggetti sani, la corteccia prefrontale ventromediale e inferiore-mediale è coinvolta in maniera preponderante nello stato affettivo autoreferenziale (Phan KL), (Steele JD). mentre la corteccia prefrontale dorsolaterale (DLPFC) è più coinvolta nell'elaborazione di stimoli con contenuto emotivo non autoreferenziale, ad esempio volti o scene visive (Ueda K), (Sergeyev K). Tuttavia, questa distinzione, che riflette il fatto che la corteccia prefrontale mediale è generalmente più coinvolta nell'emotività e la corteccia prefrontale laterale nell'elaborazione cognitiva, è graduale. Inoltre, è stata descritta una differenza emisferica di elaborazione del contenuto emotivo positivo e negativo. L'umore felice e gli stimoli emotivi positivi sono indotti dall'attività predominante della corteccia frontale sinistra (Habel U) (Herrington JD). Partendo da questi dati, abbiamo trovato risultati riguardanti l'associazione tra i tratti della personalità e l'effetto sia della tDCS anodica che dell'allenamento video, in particolare un miglioramento dell'attività motoria dopo lo stimolo sulle aree menzionate.

Limitazioni

Il disegno di tipo cross-over e la presenza di drop-out rappresentano i limiti dello studio, tuttavia è stato applicato un lungo periodo di wash-out tra gli esperimenti per definire l'effetto carry-over, mentre il calcolo della dimensione del campione garantisce l'affidabilità dei risultati. Naturalmente, uno studio RCT su un campione più ampio di atleti può essere utile per confermare i nostri risultati.

Conclusione

Questo studio evidenzia l'importanza dell'interferenza tra le funzioni cognitive e le prestazioni motorie. Il miglioramento della capacità di predizione, sia attraverso la tDCS anodica su IFC sia l'osservazione dell'azione di gesti errati, ha dimostrato di migliorare le prestazioni motorie dei giocatori d'élite di pallavolo. Inoltre, questo studio conferma il ruolo dell'IFC nella capacità di previsione e la possibilità di influenzare l'IFC attraverso a-tDCS al fine di migliorare le funzioni cognitive come: capacità esecutive, attenzione sostenuta, percezione visiva e memoria. Anche un allenamento cognitivo basato sull'osservazione dell'azione degli errori migliora sia le capacità motorie sia cognitive che sono coinvolte nell'elevata velocità di coordinazione motoria. Alcuni tratti della personalità possono influenzare il comportamento motorio e cognitivo e gli effetti dell'allenamento.

Questi risultati aprono nuove opzioni e nuove soluzioni per gli allenamenti di tipo motorio degli atleti.

Figure

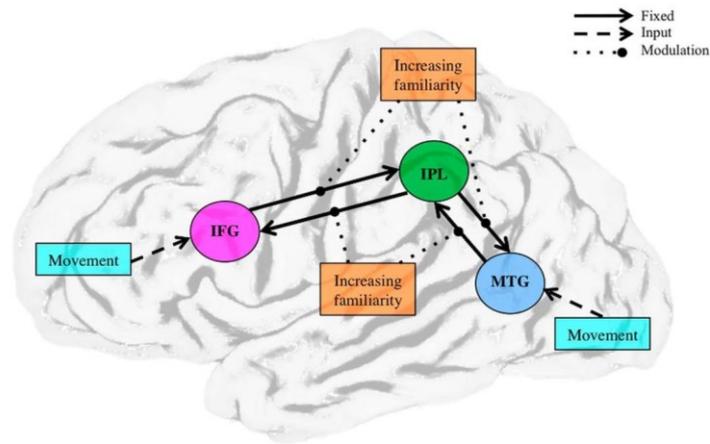


Figura 1. Action Observation Network e le interazioni dei Nodi durante l'apprendimento motorio. IFG: Giro Frontale Inferiore; IPL: Lobulo Parietale Inferiore; MTG: Giro Temporale Mediale.

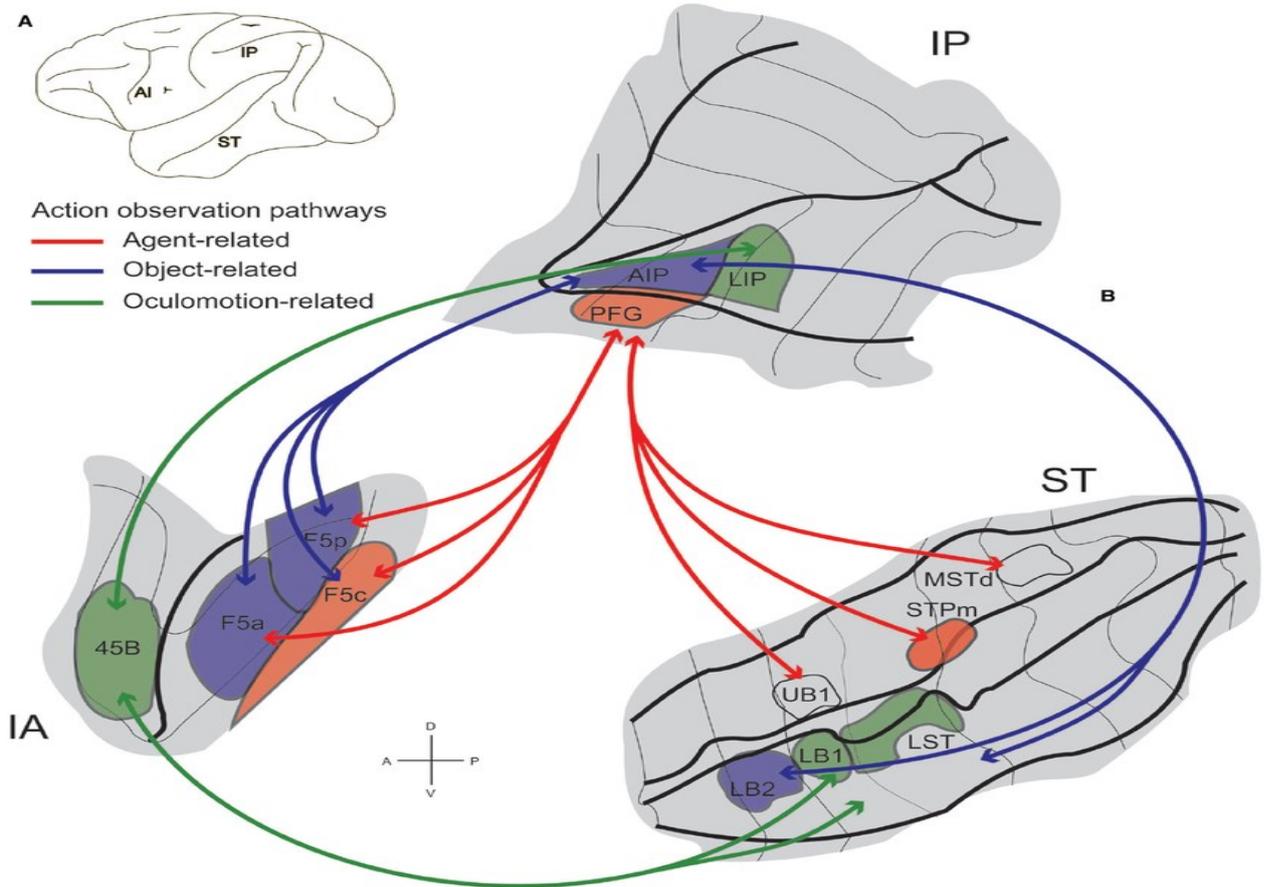


Figura 2. STS-IPL-F5 grasping observation networks nella scimmia.

(A) Vista laterale di un cervello di macaco che mostra le posizioni delle tre regioni coinvolte nell'action observation: Solco Arcuato Inferiore (IA), Solco Intraparietale e lobulo parietale inferiore (IP) e solco Temporale Superiore (ST).

(B) Rappresentazione bidimensionale del solco arcuato inferiore, intraparietale e temporale superiore. L'informazione visiva delle azioni osservate può essere inviata dall' STS attraverso la corteccia parietale all'area premotoria F5 lungo due percorsi funzionali: un STPm-PFG-F5c, un pathway legato al soggetto dell'action observation (linee rosse) e un LB2-AIP-F5a/p e un pathway legato all'oggetto dell'action observation (linee blu). L'informazione visiva dall'STS può anche raggiungere le aree parietali e prefrontali coinvolte nell'oculomozione, attraverso il pathway LB1/LST-LIP-45B dell'action observation (linee verdi). Le frecce specificano i percorsi funzionali.

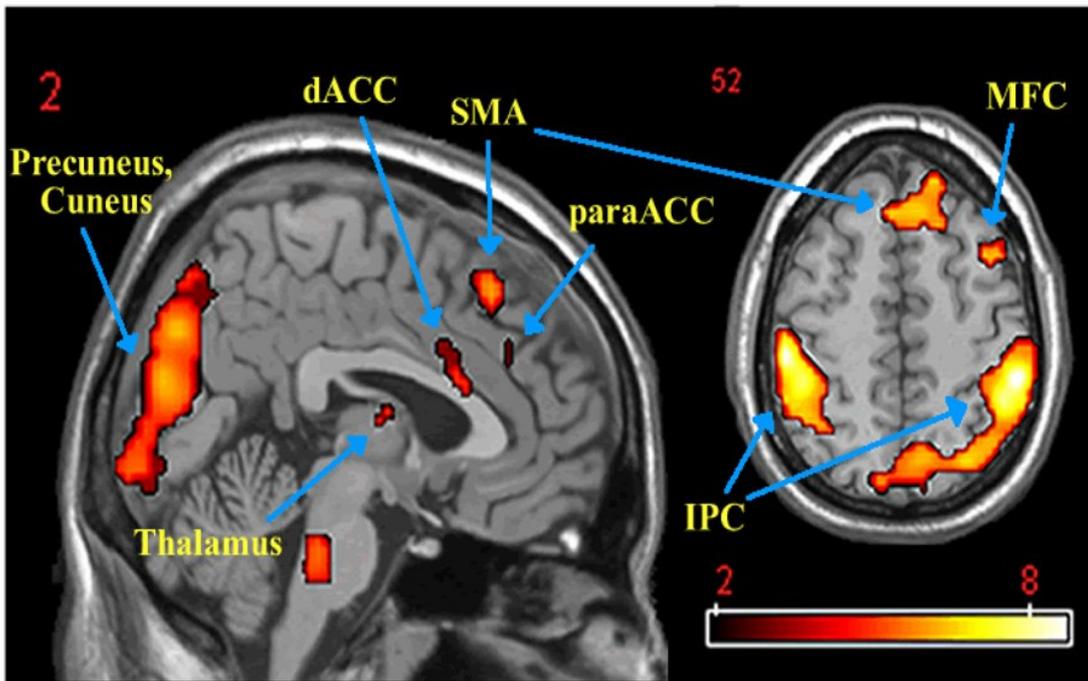


Figura 3. Regioni che mostrano un aumento di attività durante l'osservazione di una pressione di pulsanti sbagliati paragonata all'osservazione della pressione di pulsanti corretti. dACC = corteccia cingolata antero-dorsale; IPC = corteccia parietale inferiore; paraACC = corteccia paracingolata; MFC = corteccia frontale mediale; SMA = area motoria supplementare.

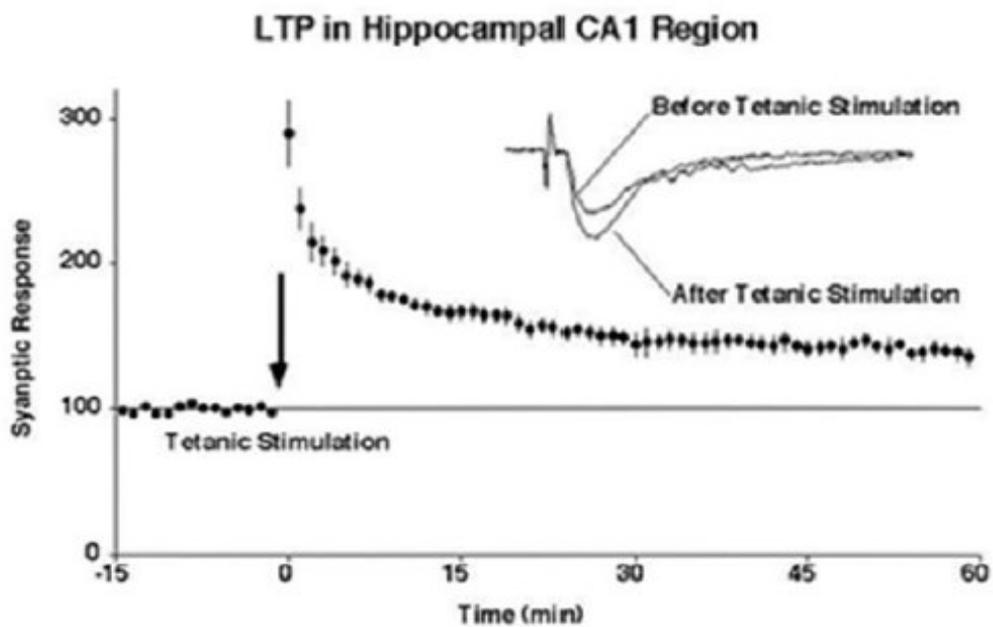


Figura 4. Risposta sinaptica dopo uno stimolo tetanico mantenuto nel tempo.

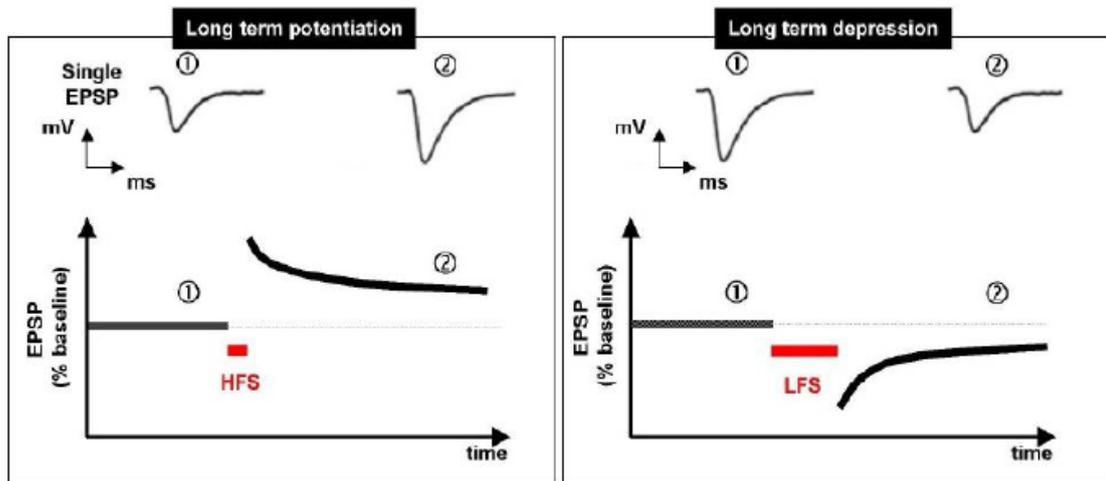


Figura 5. Neuroplasticità: differenza tra LTP e LTD.

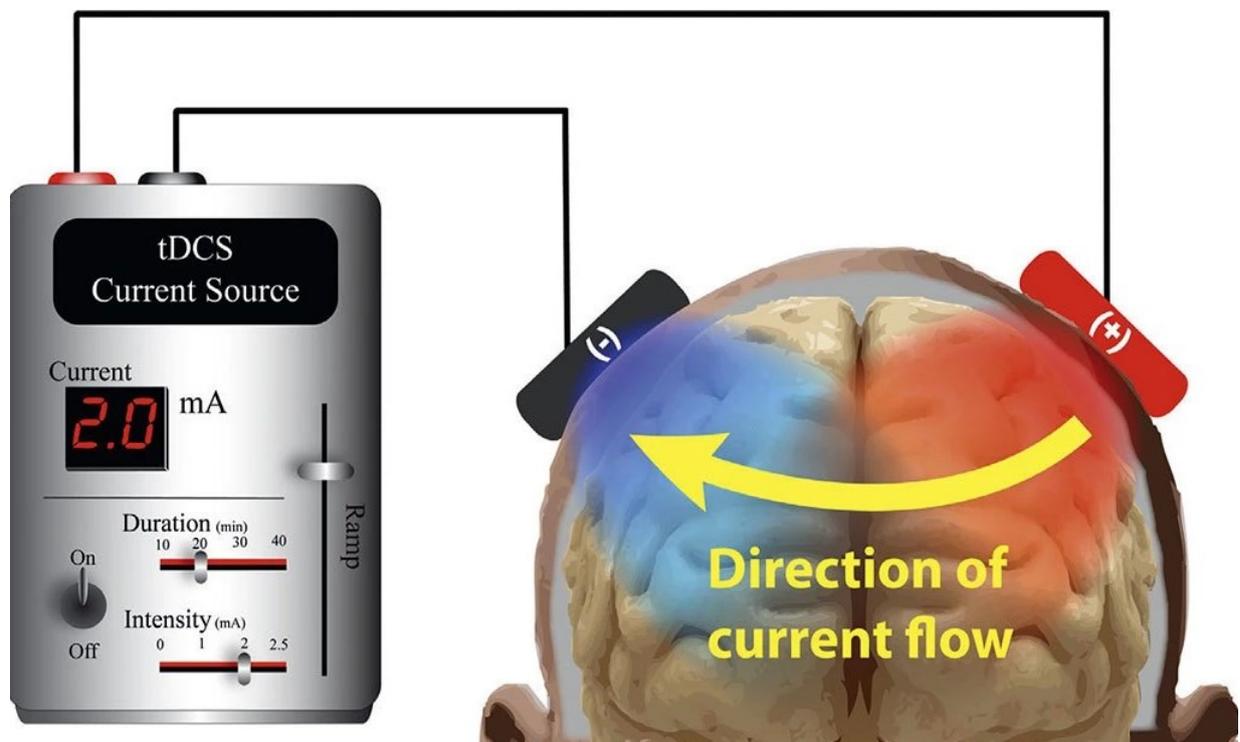


Figura 6. Dispositivo tDCS e la sua applicazione.

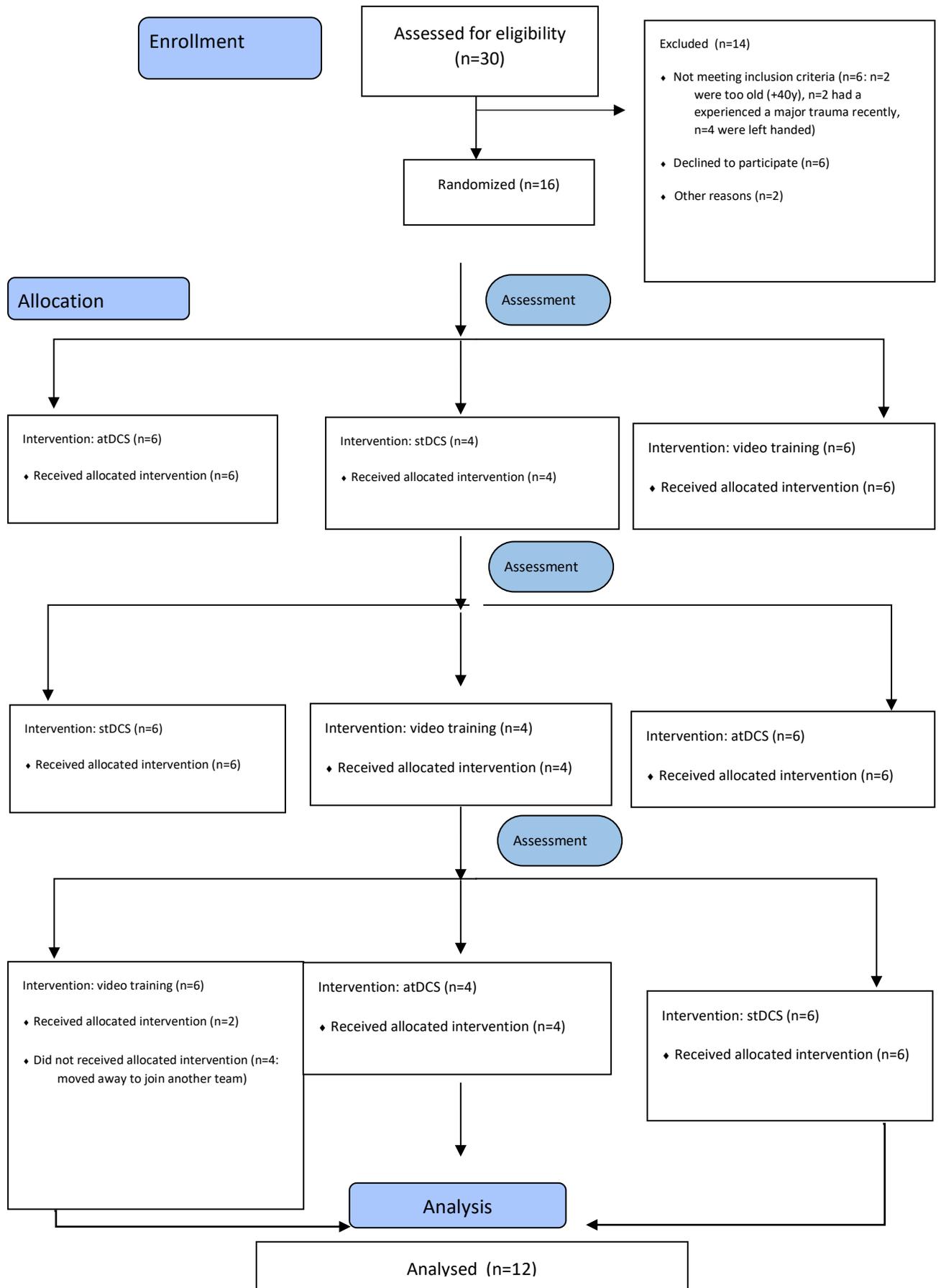


Figura 7. Diagramma di flusso.

 UTENTE: ALESSANDRO GIOMBINI	
DATA DI NASCITA	01 JAN 0001
INDIRIZZO	VIA NULL NULL, NULL

PROGRAMMA RIABILITATIVO	STATO DI AVANZAMENTO	ULTIMO ALLENAMENTO
PALLAVOLO DURATA: 6 GIORNI	83% 18 Jun 2019 - 21 Jun 2019 <div style="width: 83%; height: 10px; background-color: green; margin-top: 5px;"></div>	21 Jun 2019

Figura 8. Pagina di login del software online per il training video svolto a casa. In basso, mostrato in verde: progresso dell'allenamento (%).

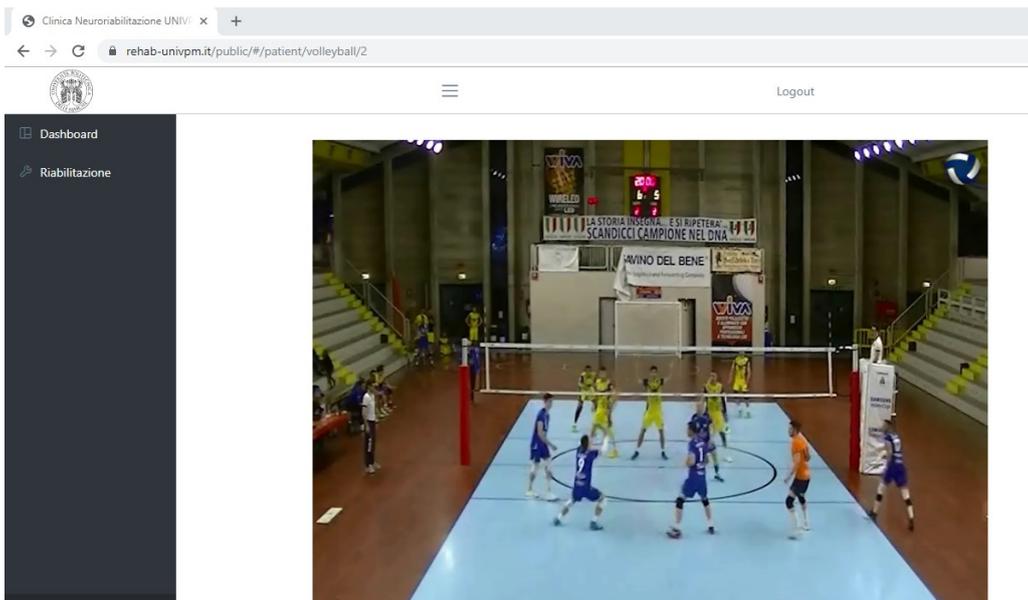


Figura 9. Software del training video svolto a casa.

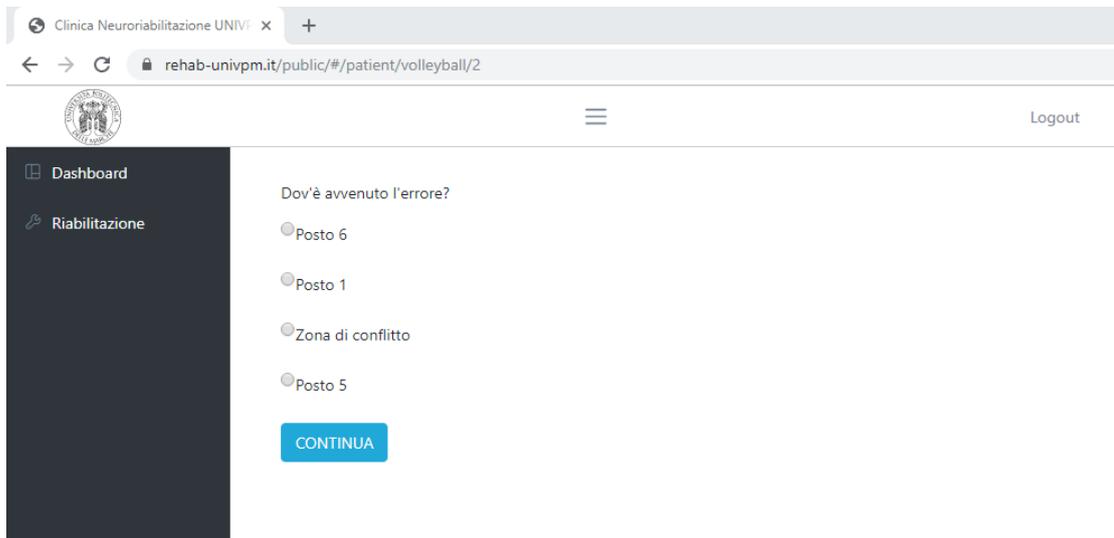


Figura 10. Domande interattive durante il training video svolto a casa.



Figura 11. Task motorio
1) Macchina spara-palloni 2) Scoutman 3) Performance del task motorio dell'atleta 4) Target in posizione 3.

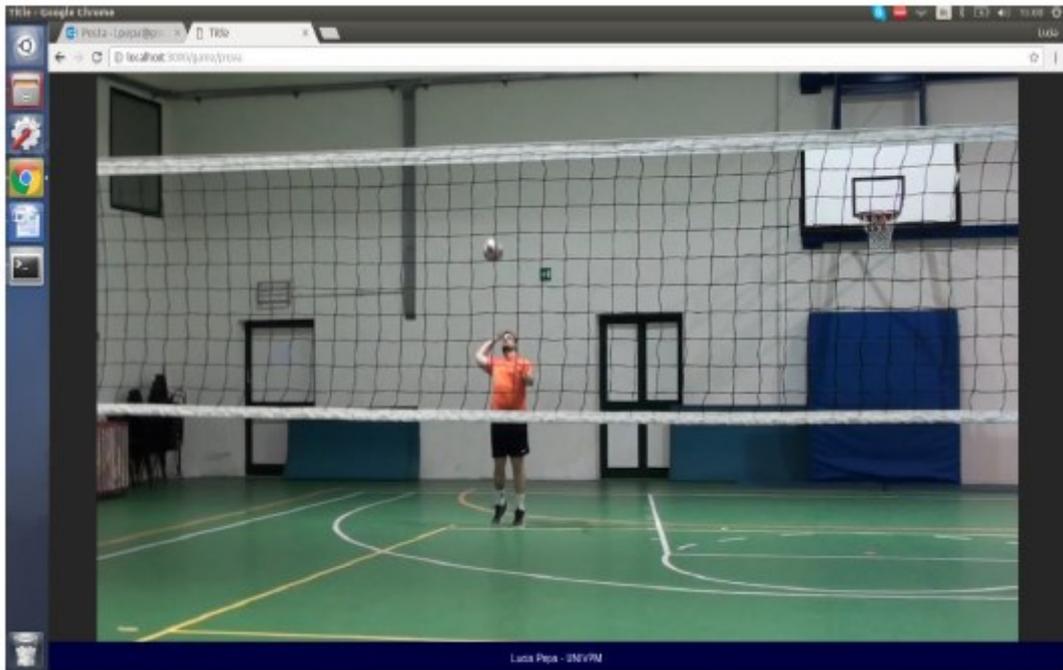


Figura 12. Frame del software nell'Action Prediction Task.

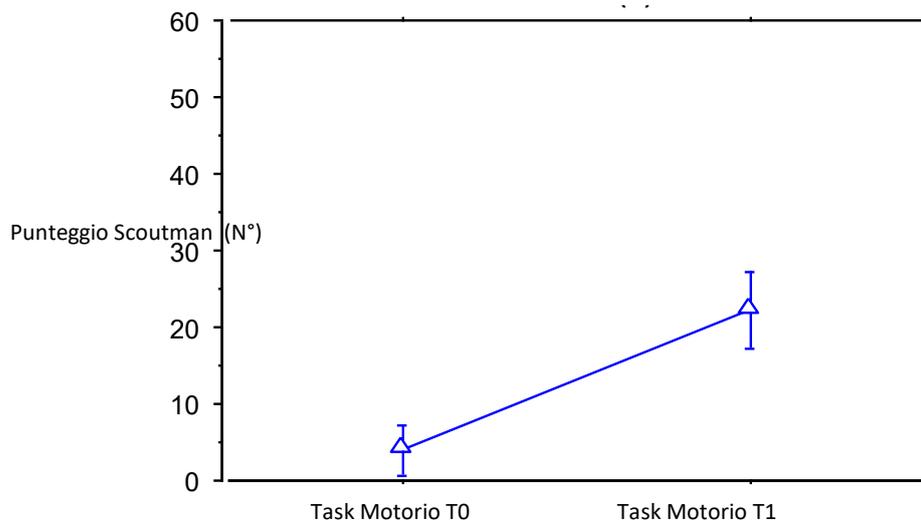


Figura 13. L'effetto della a-tDCS sul task Motorio. T0: prima del trattamento; T1 dopo il trattamento;

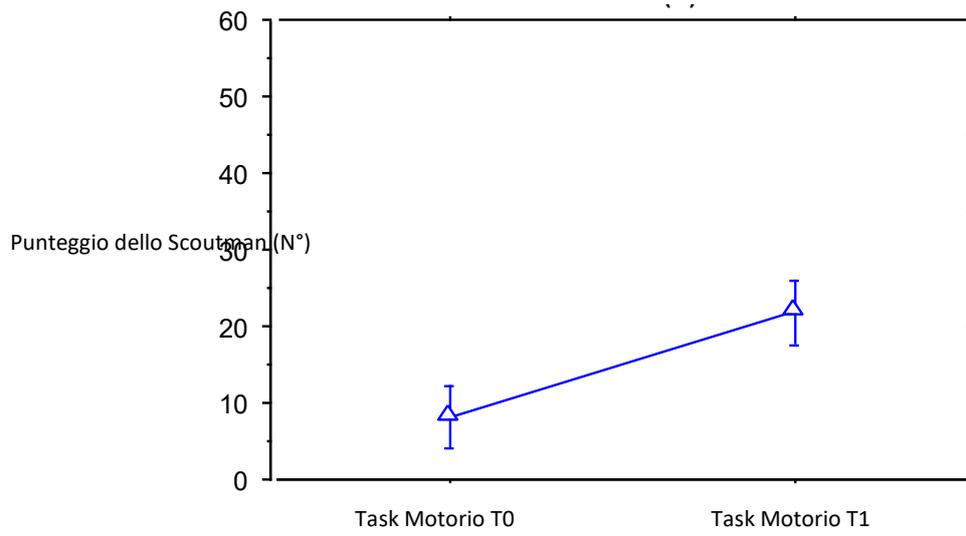


Figura 14. L'effetto del training video sul Task Motorio.
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

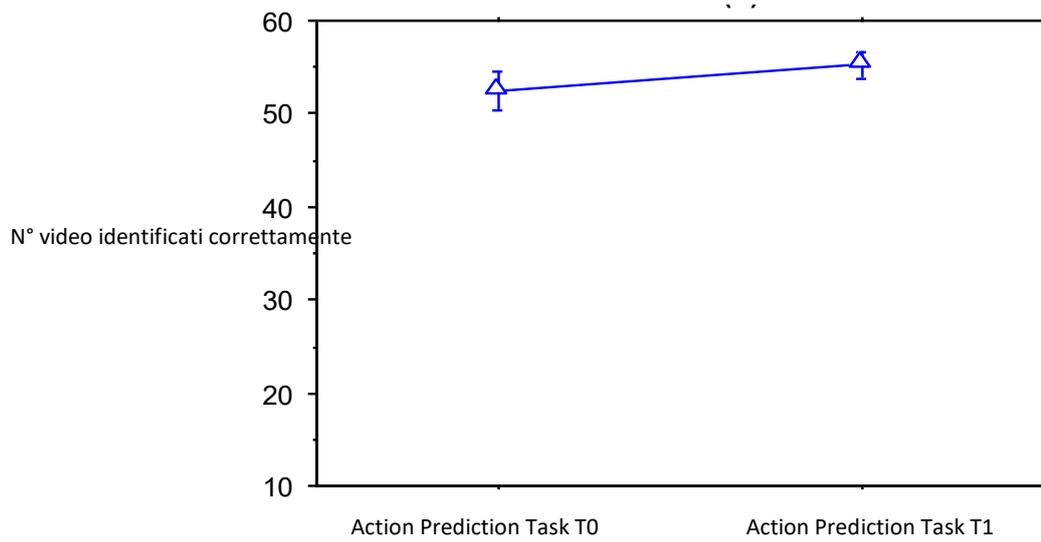


Figura 15. L'effetto dell' a-tDCS sull'action prediction task (conteggio dei video identificati correttamente)
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

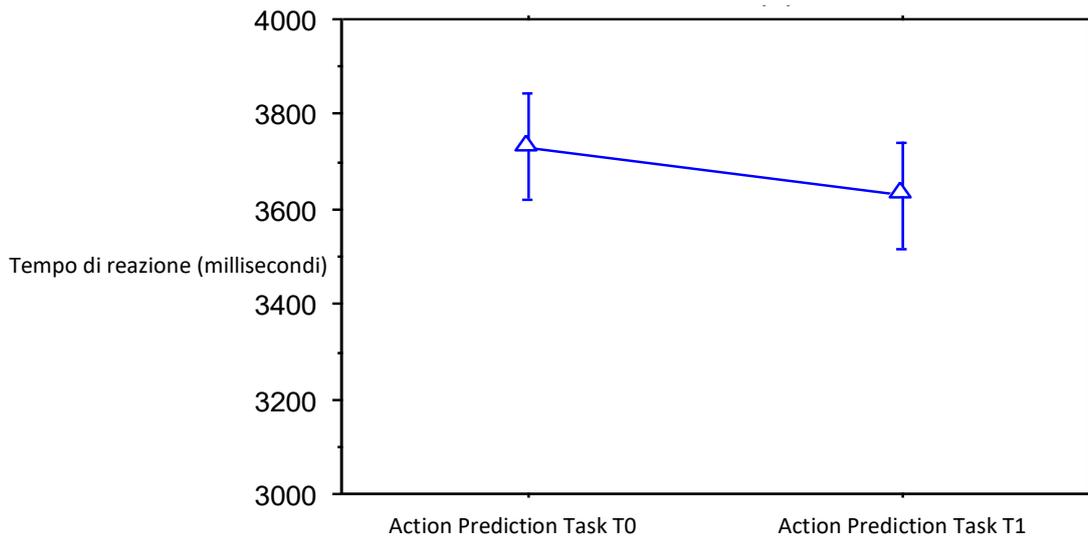


Figura 16. L'effetto dell' a-tDCS sull'action prediction task (tempo di reazione)
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

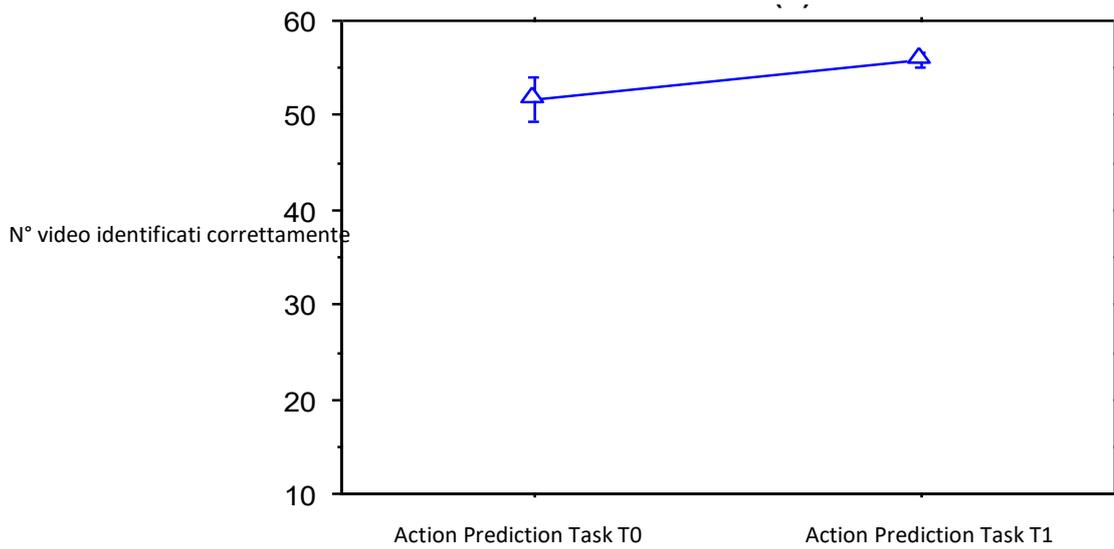


Figura 17. L'effetto del training video sull'action prediction task (conteggio dei video identificati correttamente)
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento

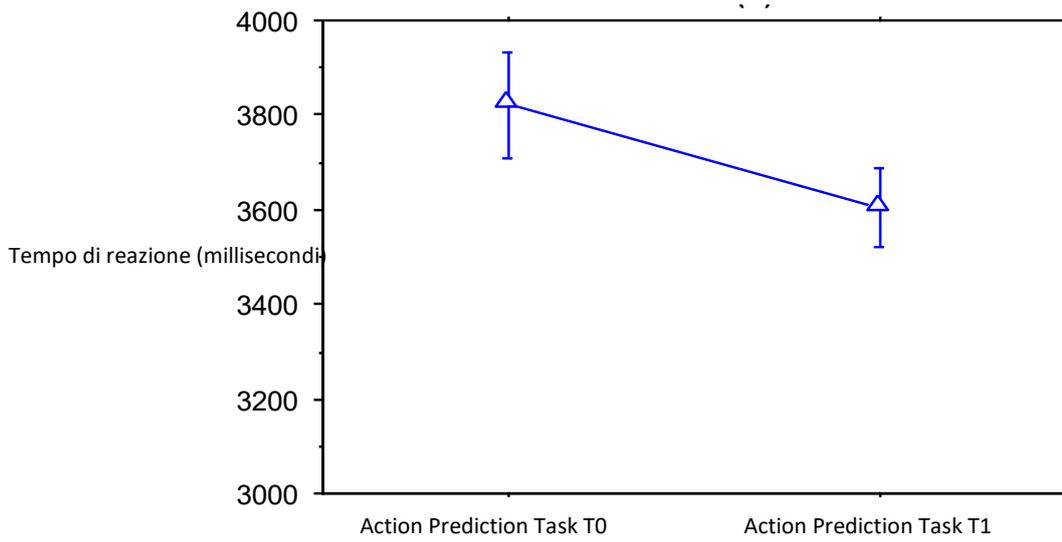


Figura 18. L'effetto del training video sull'action prediction task (tempo di reazione)
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

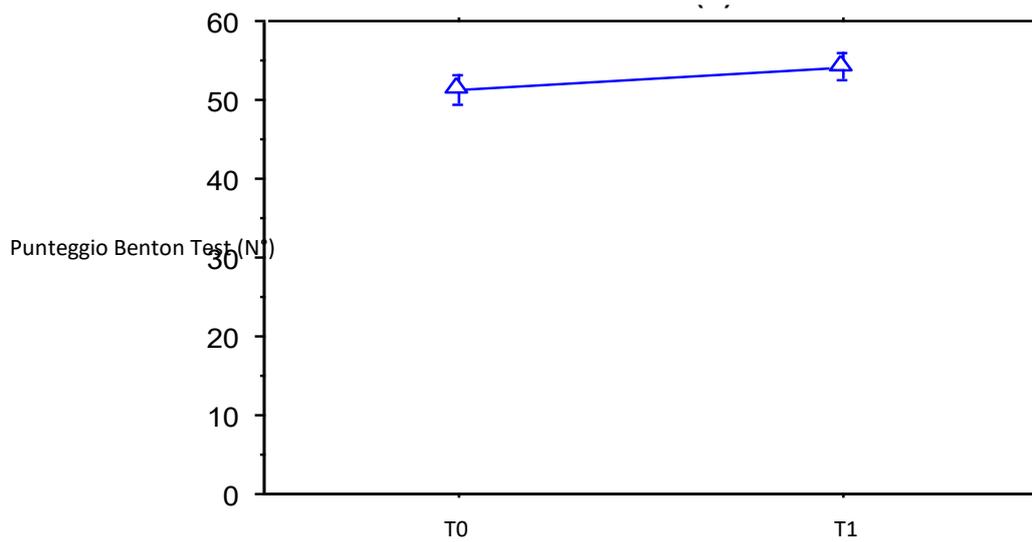


Figura 19. L'effetto dell'a-tDCS sulla performance del Benton Test (N° di risposte fornite)
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento

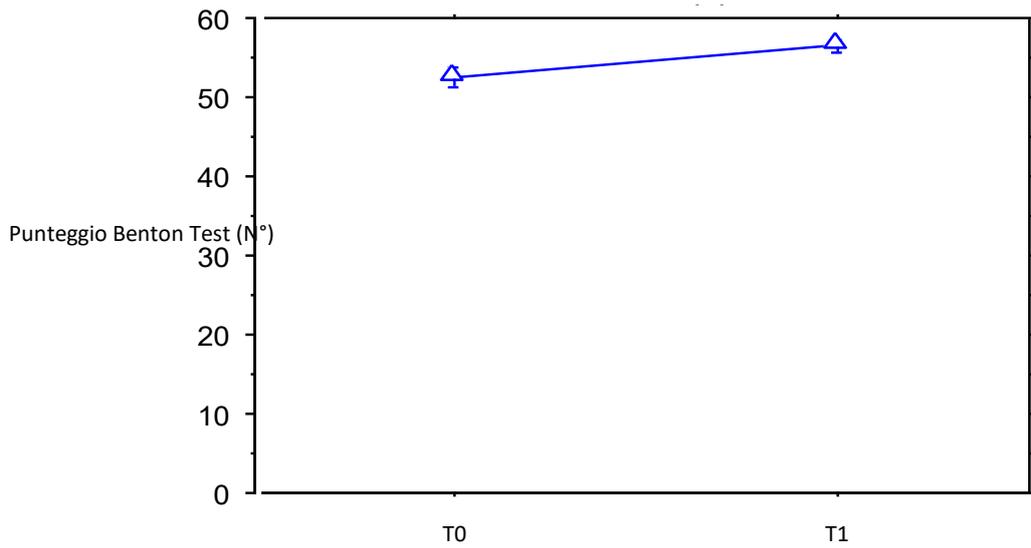


Figura 20. L'effetto del training video sulla performance del Benton Test (N° di risposte corrette fornite)
 T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

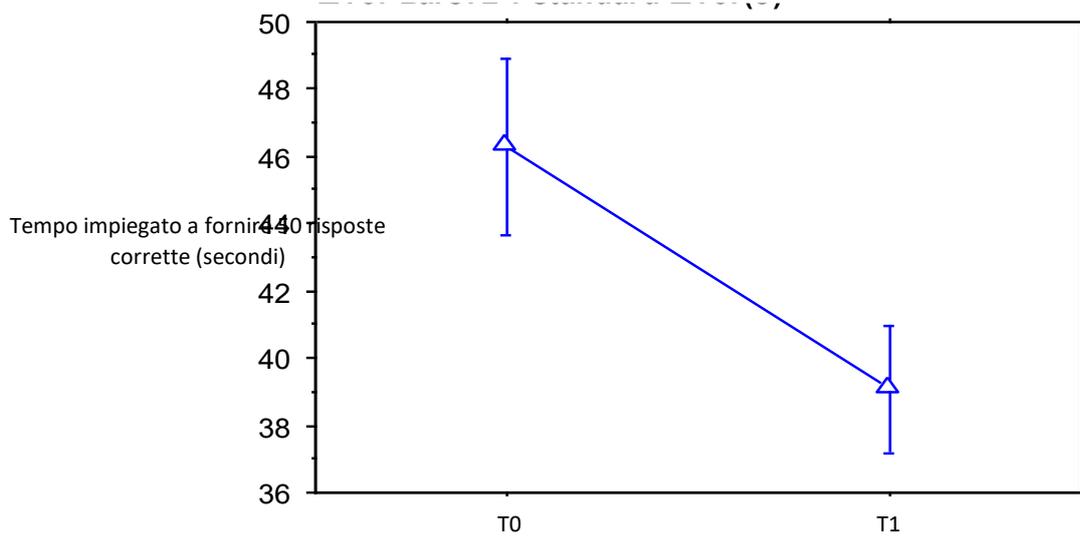


Figura 21. L'effetto dell'a-tDCS sullo Stroop Test – performance del sottotest CWT (tempo impiegato a fornire 50 risposte corrette)
 T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

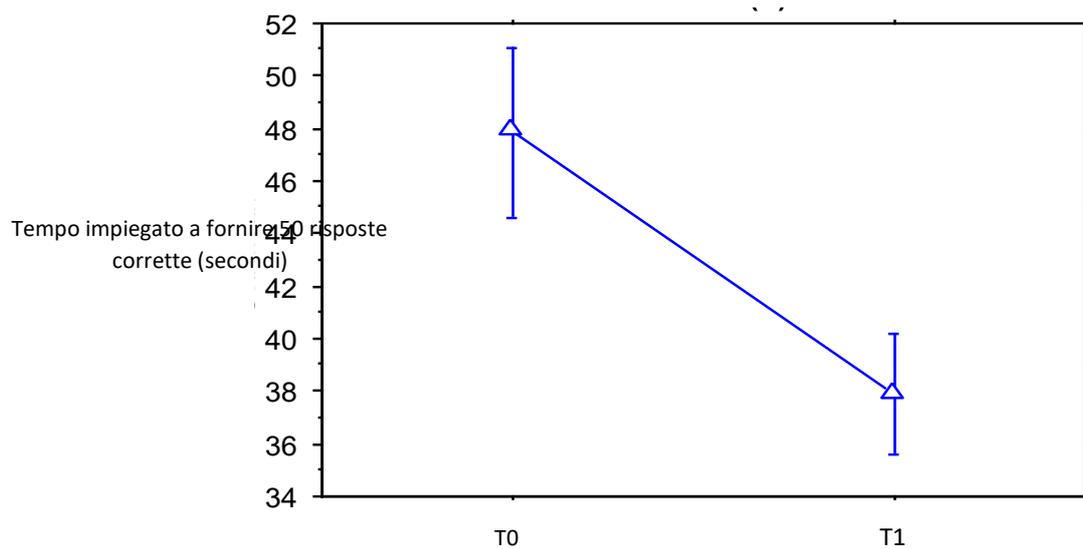


Figura 22. L'effetto del training video sullo Stroop Test – performance del sottotest CWT (tempo impiegato a fornire 50 risposte corrette)
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

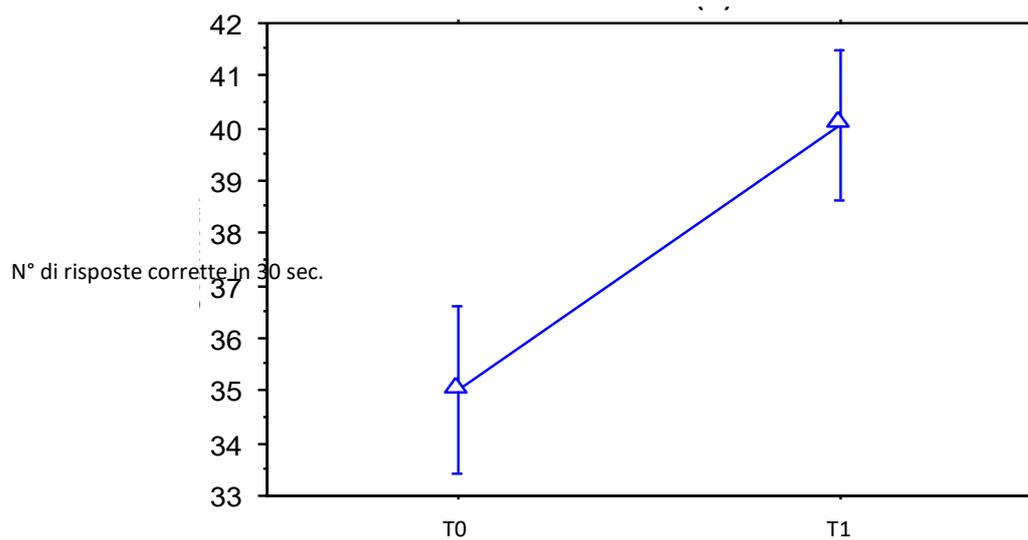


Figura 23. L'effetto dell'a-tDCS sullo Stroop Test – performance del sottotest CWT (n° di risposte corrette in 30 sec.)
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

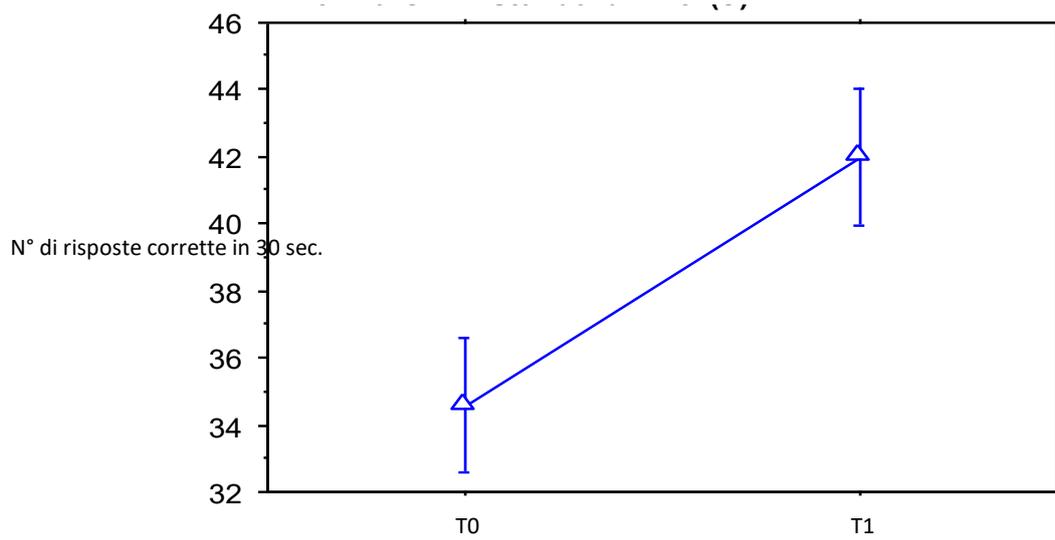


Figura 24. L'effetto del training video sullo Stroop Test – performance del sottotest CWT (n° di risposte corrette in 30 sec.)
T0: prima del trattamento; T1: dopo il trattamento;

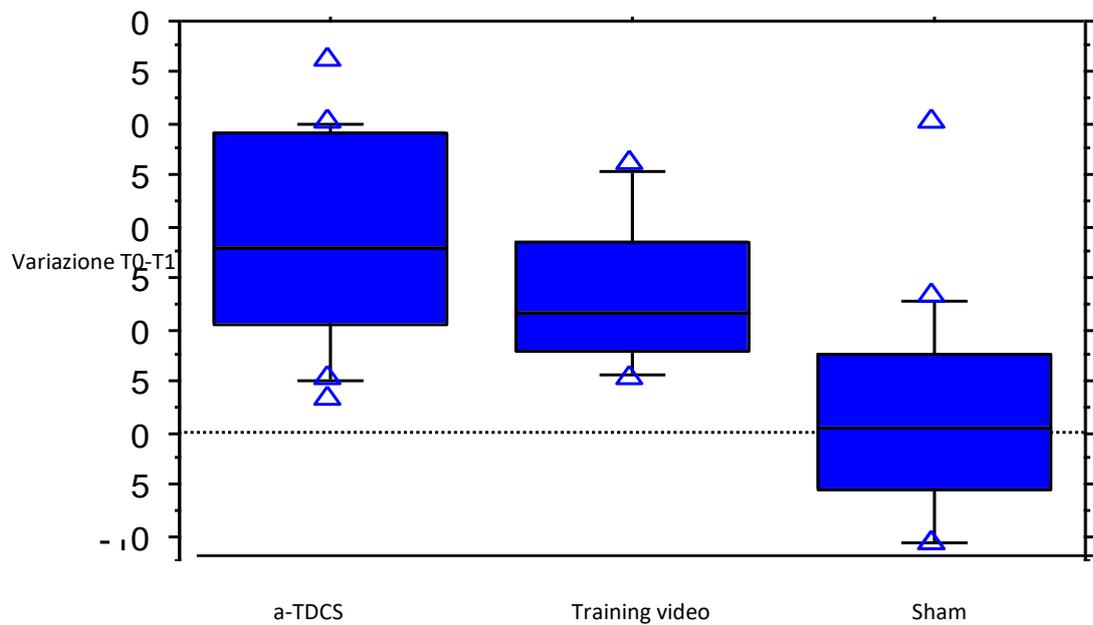


Figura 25. Evoluzione del punteggio nel task motorio dopo i rispettivi trattamenti.

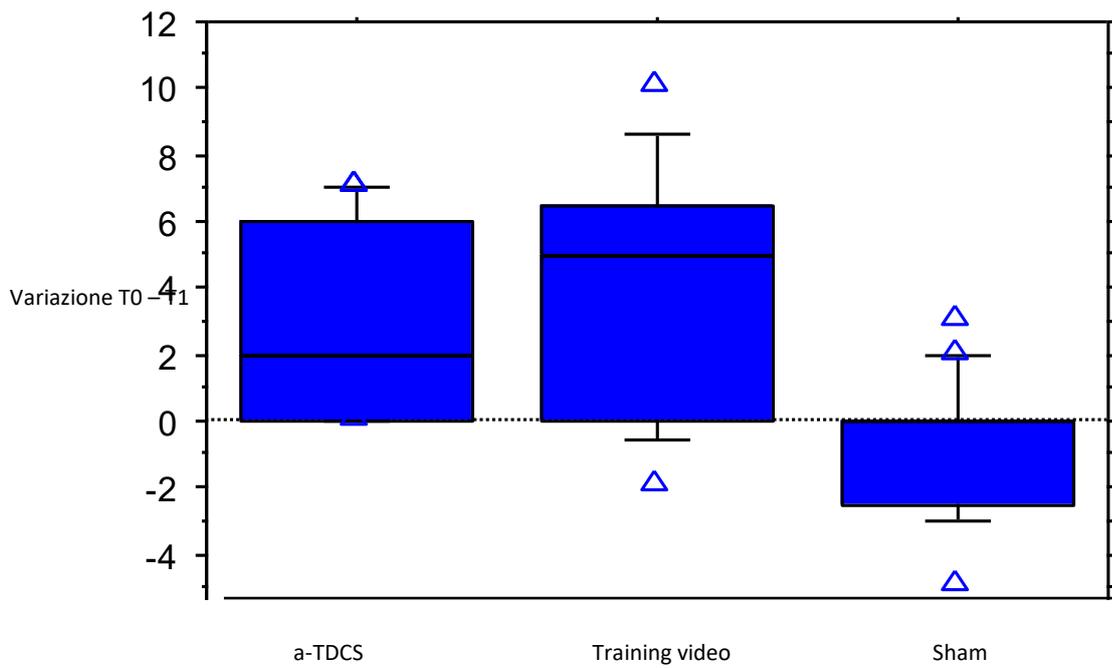


Figura 26. Evoluzione del punteggio totale nel Benton Test dopo i rispettivi trattamenti.

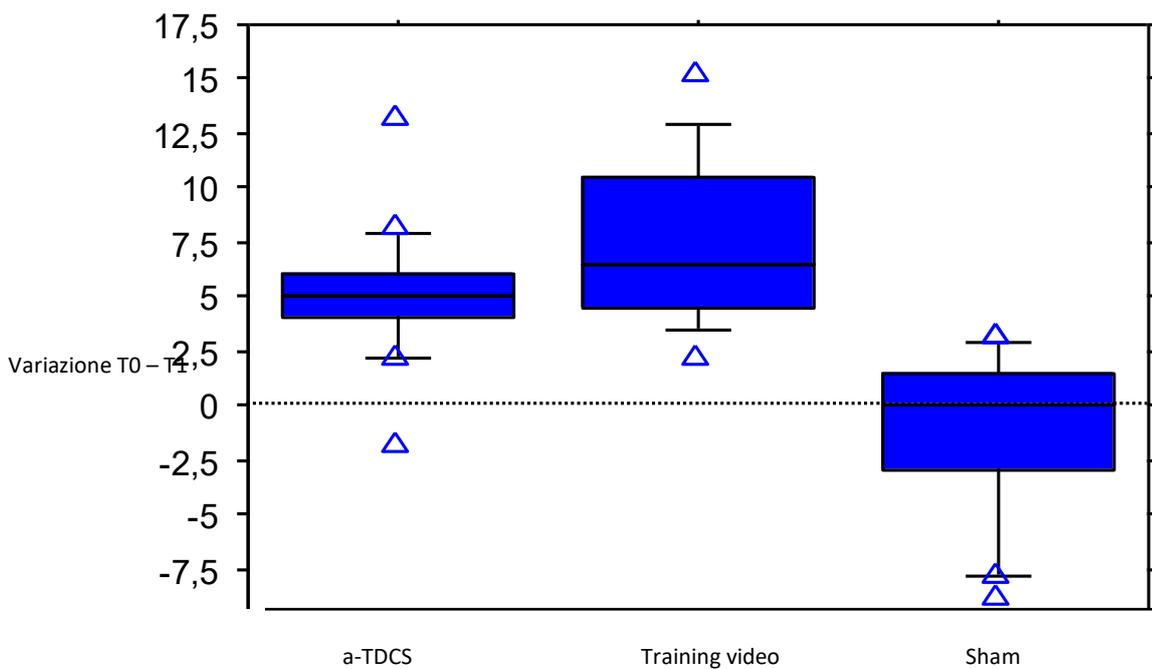


Figura 27. Evoluzione del punteggio totale nello Stroop Test – sottotest CWT, dopo i rispettivi trattamenti.

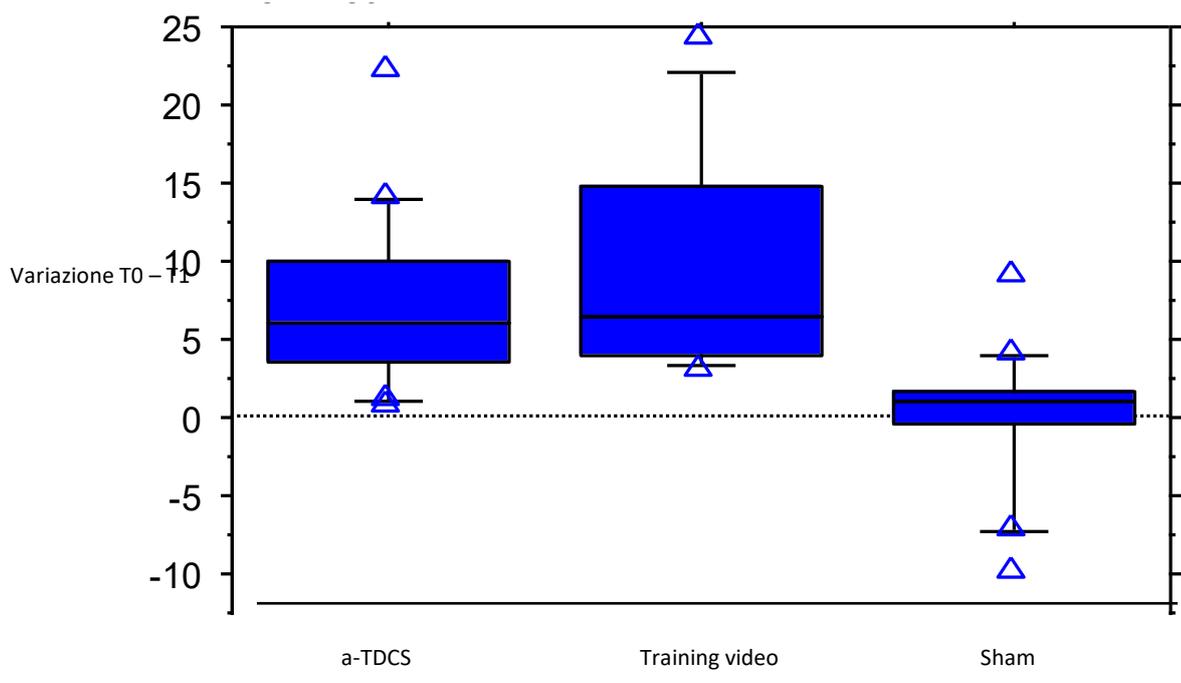


Figura 28. Evoluzione nel tempo (in secondi) della performance nello Stroop Test – sottotest CWT, dopo i rispettivi trattamenti.

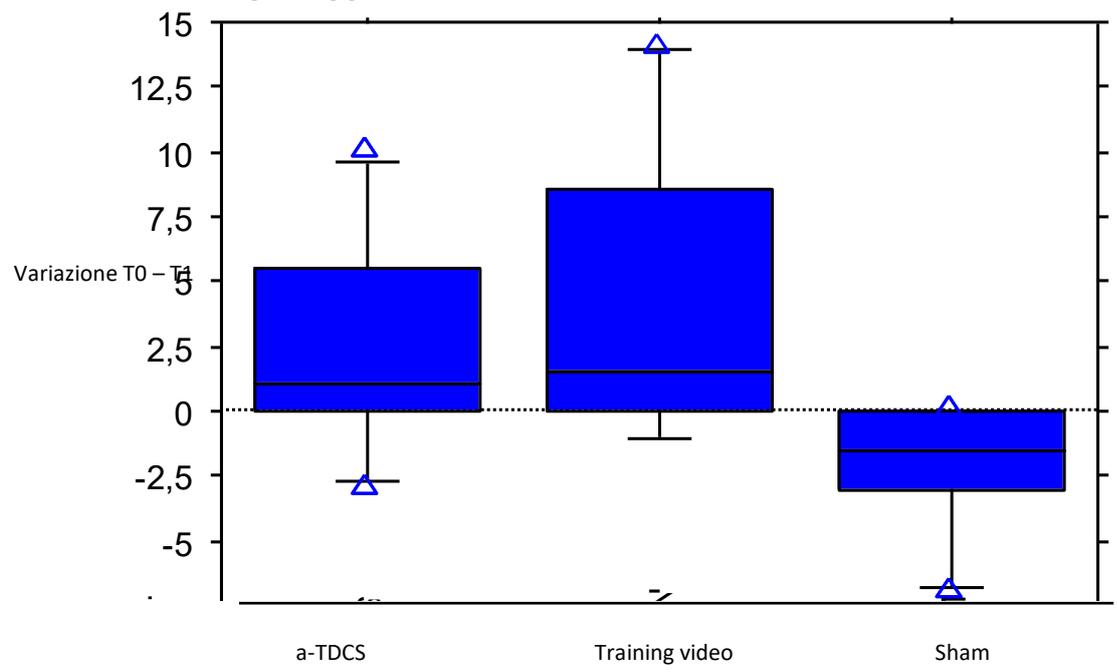


Figura 29. Evoluzione del punteggio totale nell'Action Prediction Task, dopo i rispettivi trattamenti.

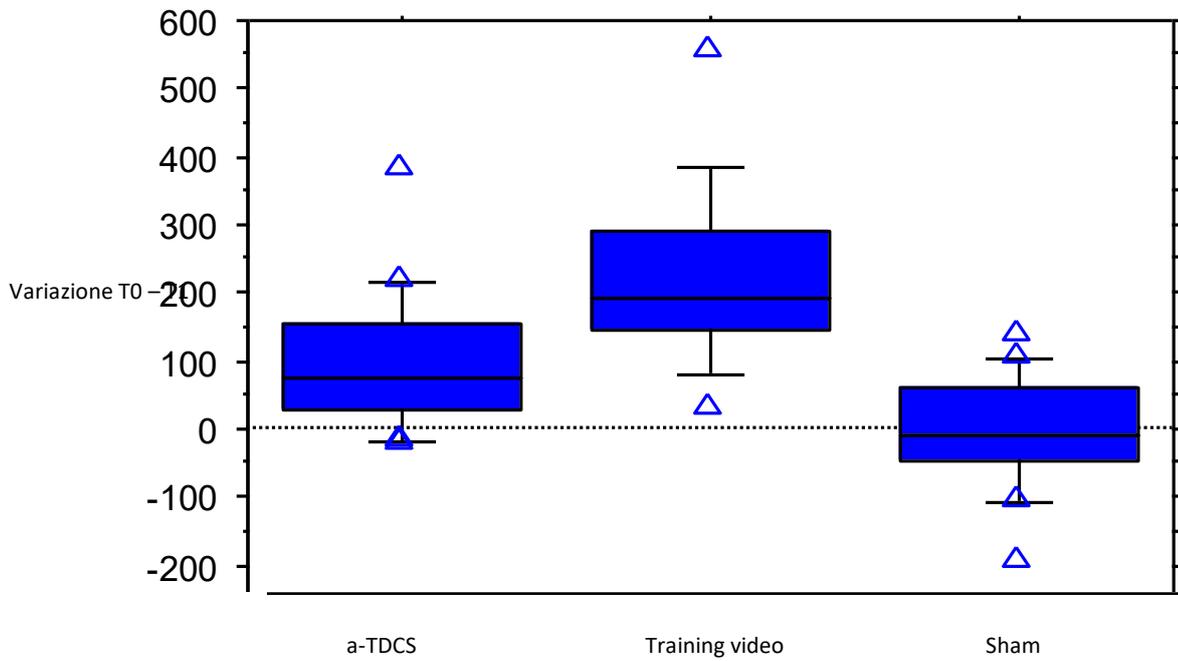


Figura 30. Evoluzione dei tempi di reazione nell'Action Prediction Task, dopo i rispettivi trattamenti.

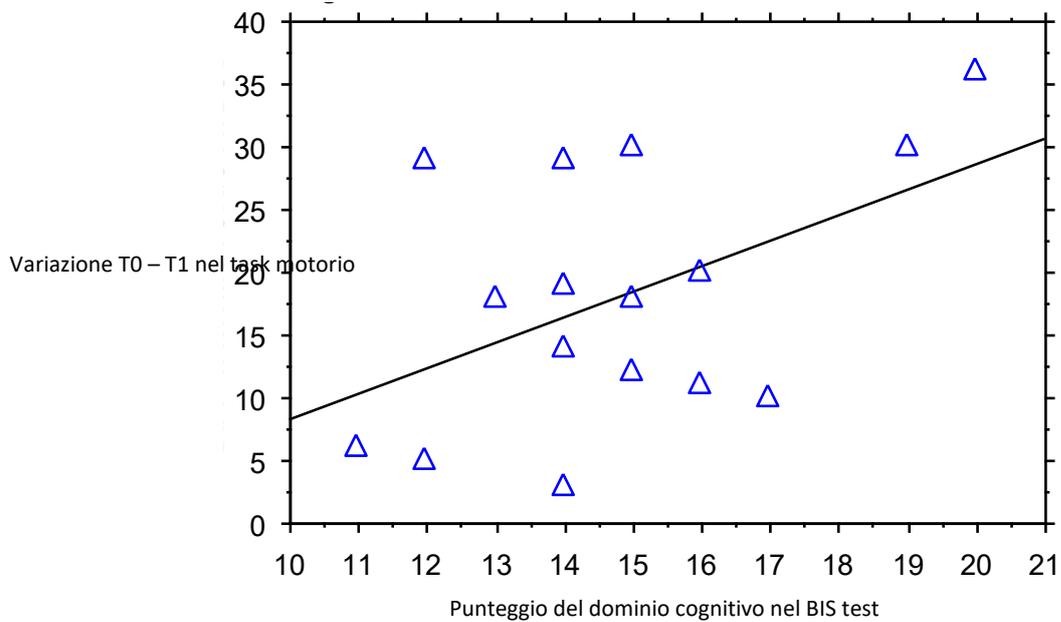


Figura 31. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio del dominio cognitivo nel BIS test.

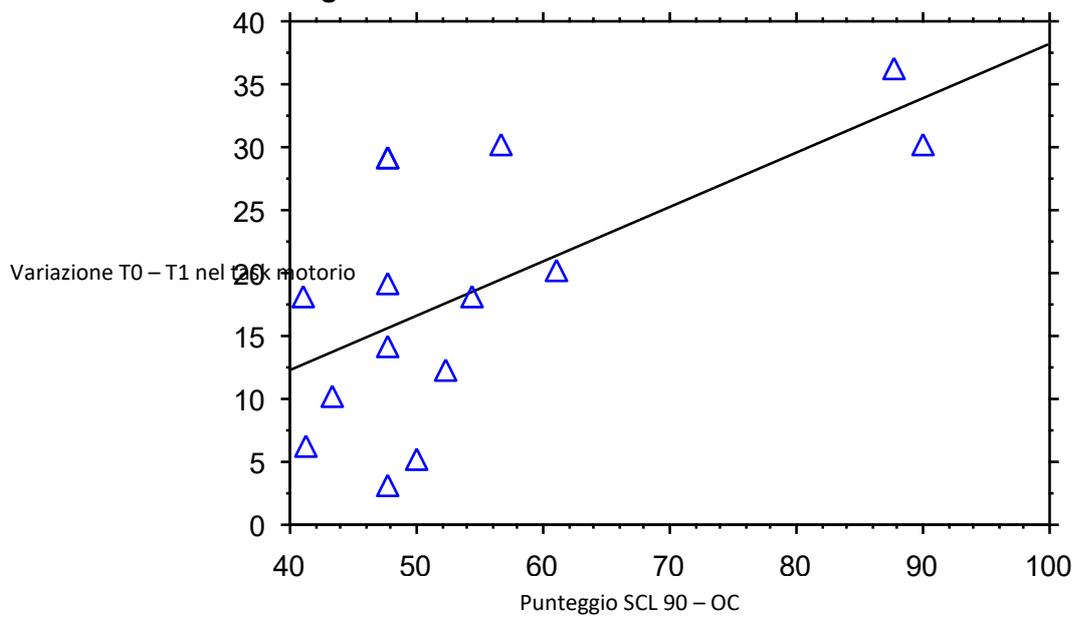


Figura 32. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 - OC.

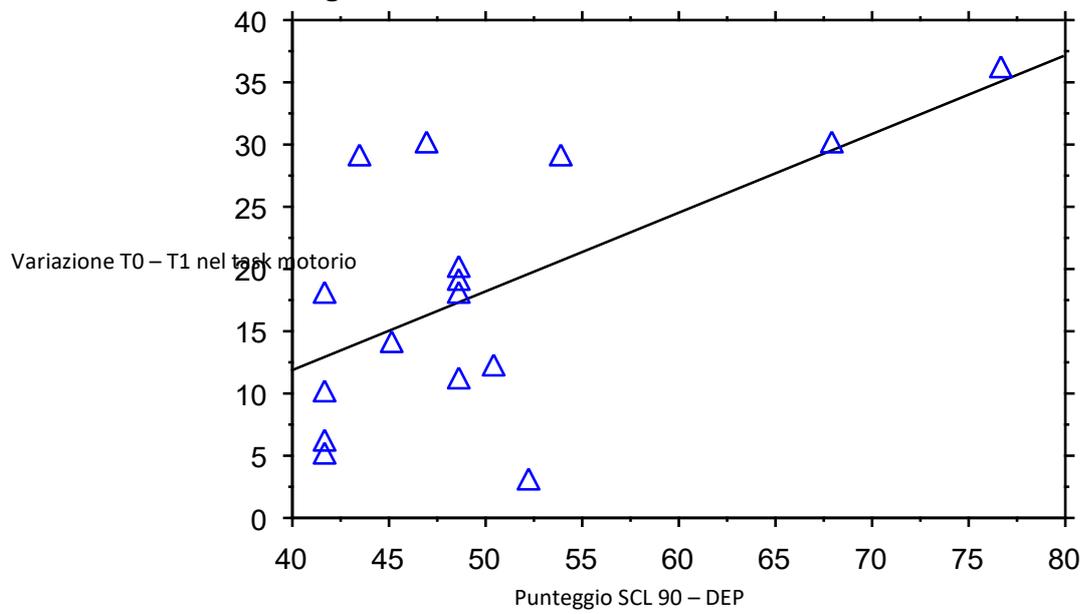


Figura 33. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 - DEP.

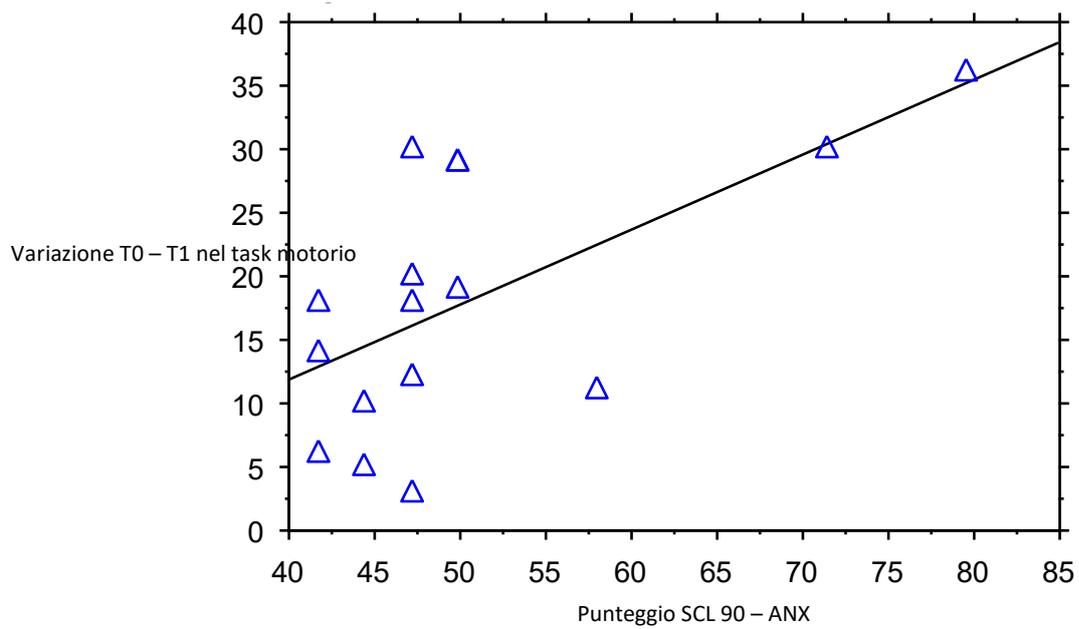


Figura 34. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 - ANX.

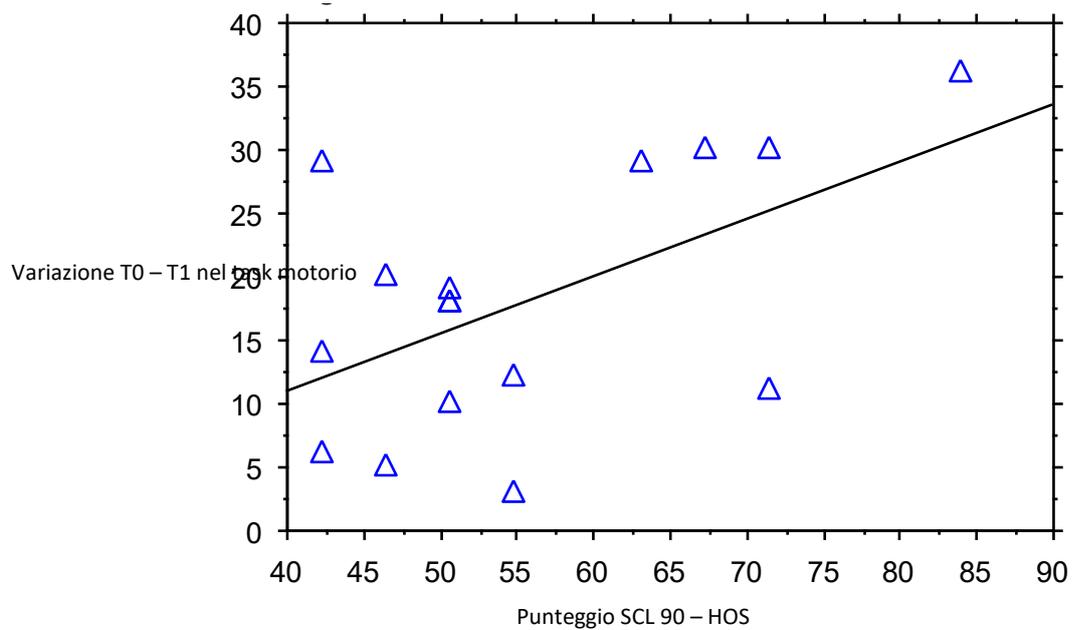


Figura 35. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 - HOS.

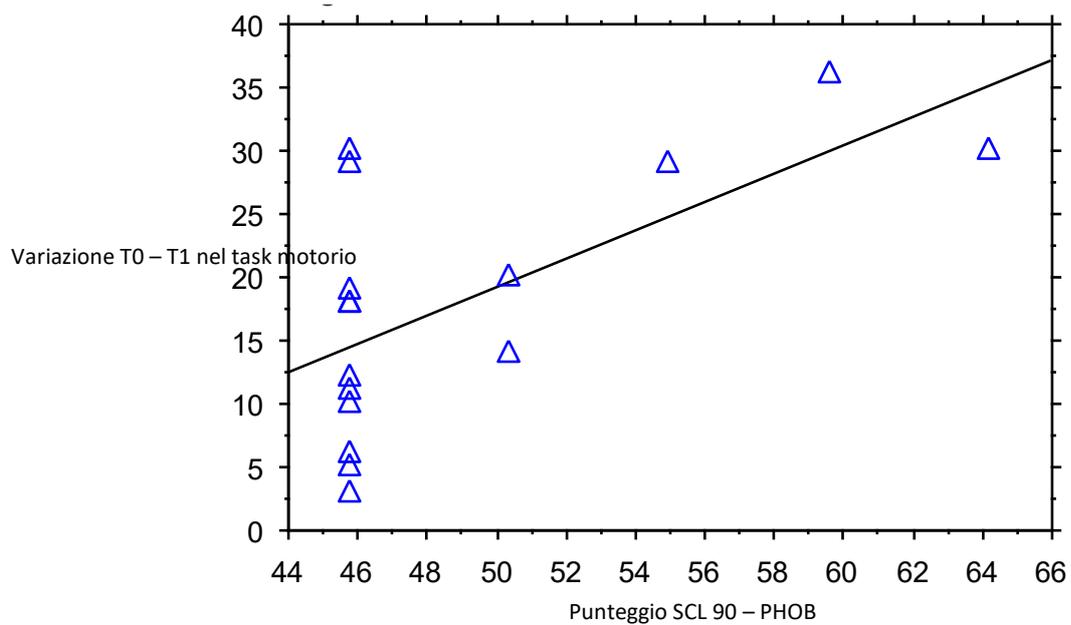


Figura 36. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 – PHOB.

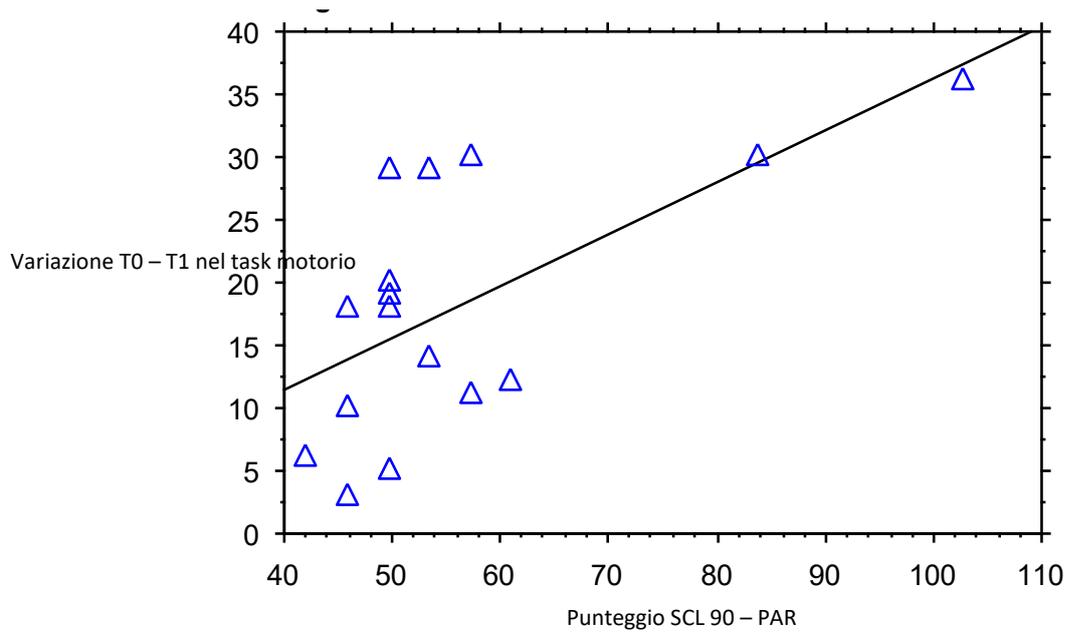


Figura 37. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 – PAR.

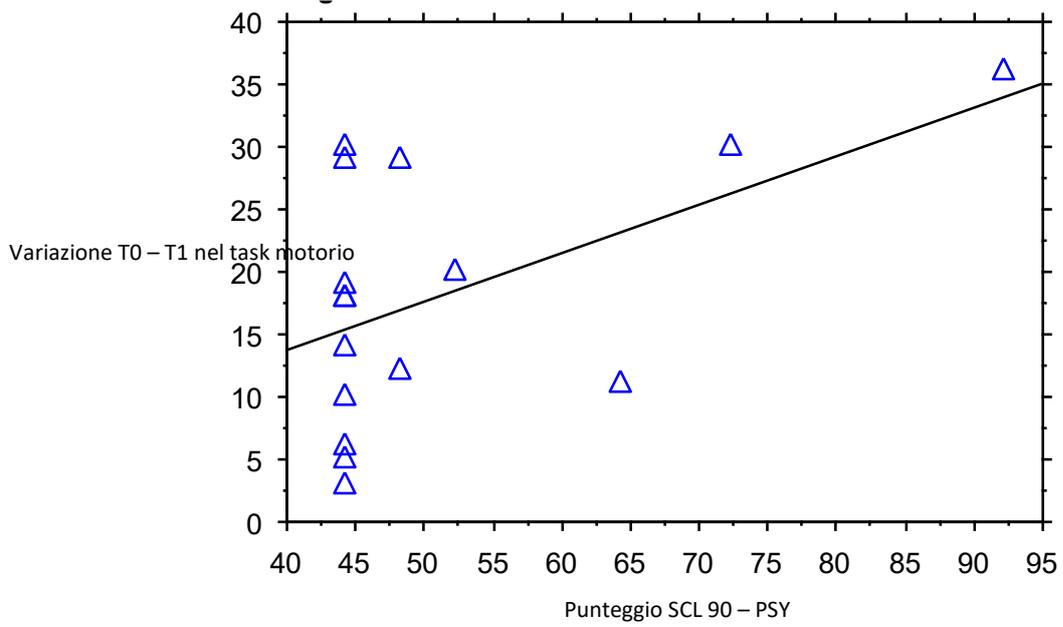


Figura 38. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 - PSY.

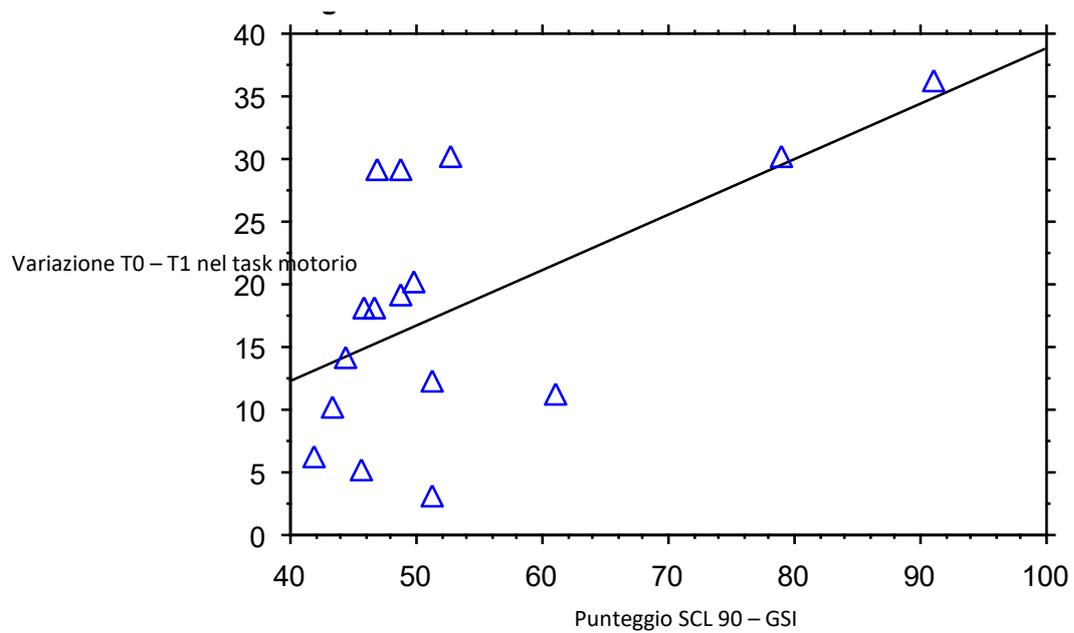


Figura 39. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 - GSI.

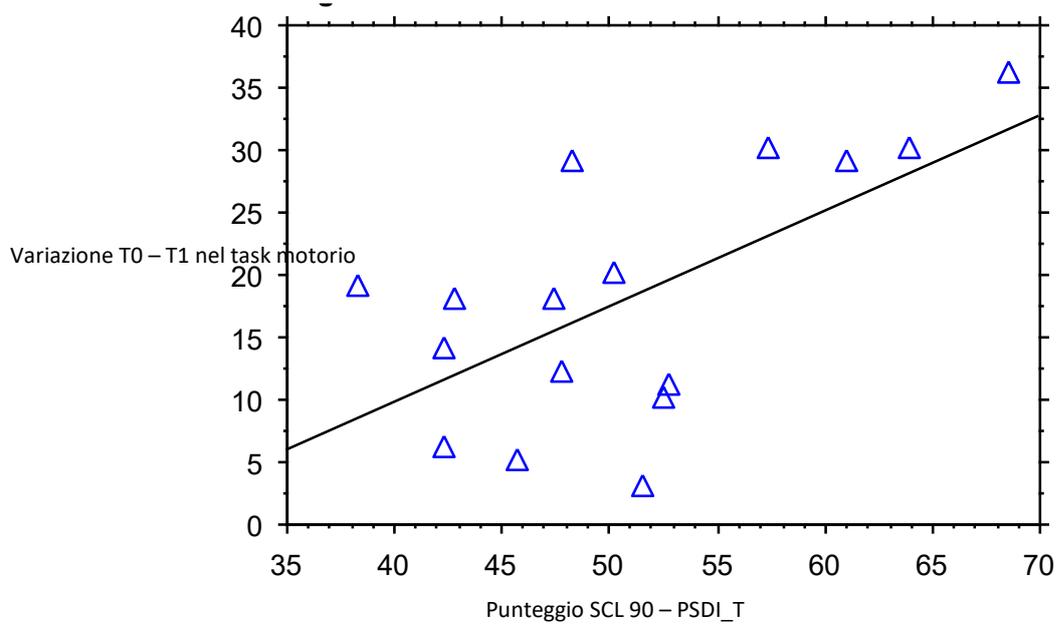


Figura 40. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 - PSDI_T.

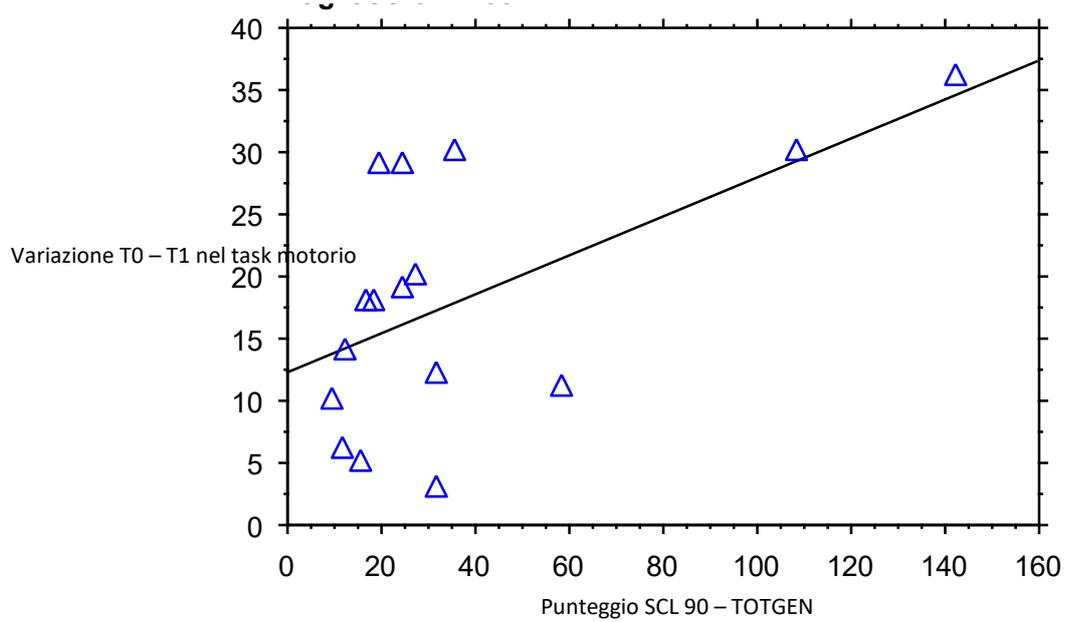


Figura 41. Correlazione tra il miglioramento del task motorio dopo a-tDCS e il punteggio SCL-90 - TOTGEN.

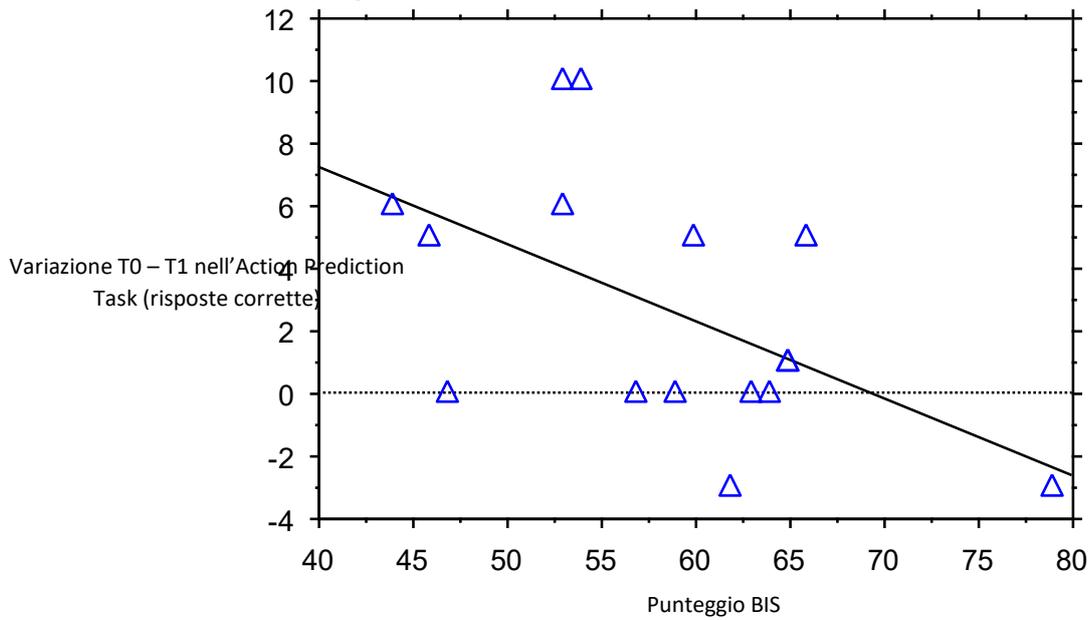


Figura 42. Correlazione tra il miglioramento dell'Action Prediction task (n° di risposte corrette) dopo a-tDCS e il punteggio del BIS test.

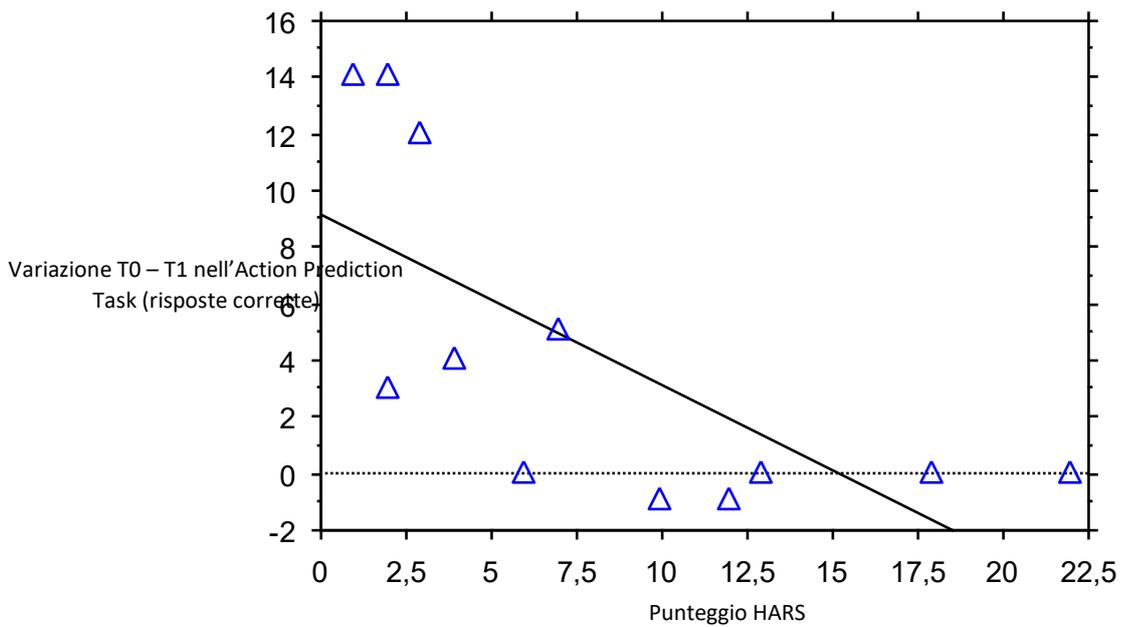


Figura 43. Correlazione tra il miglioramento dell'Action Prediction task (n° di risposte corrette) dopo a-tDCS e il punteggio HARS.

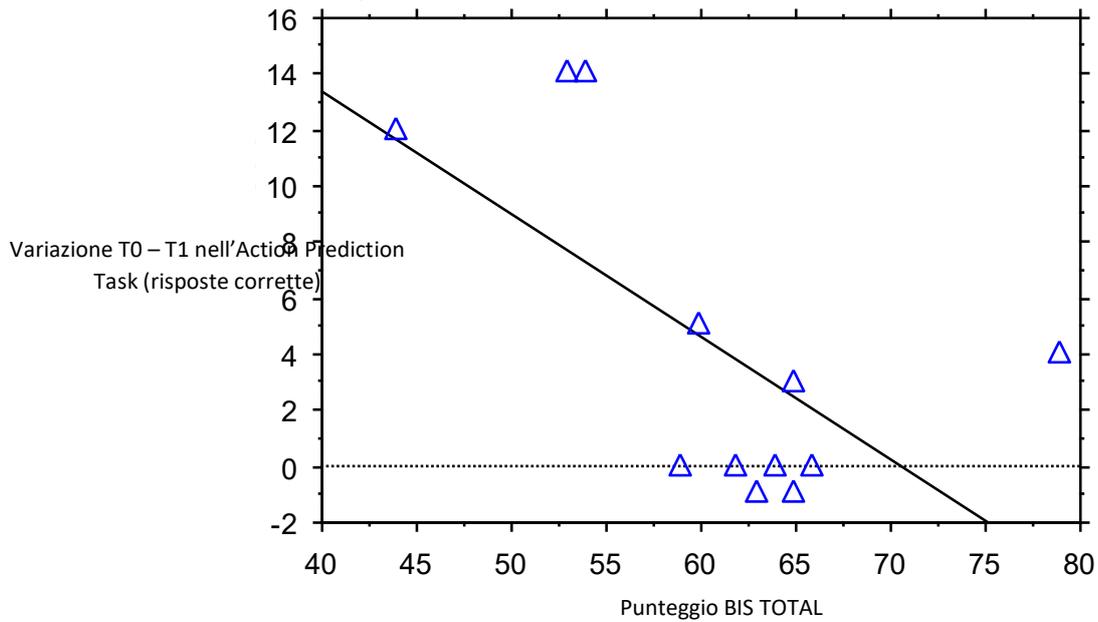


Figura 44. Correlazione tra il miglioramento dell' Action Prediction task (n° di risposte corrette) dopo a-tDCS e il punteggio BIS TOTAL.

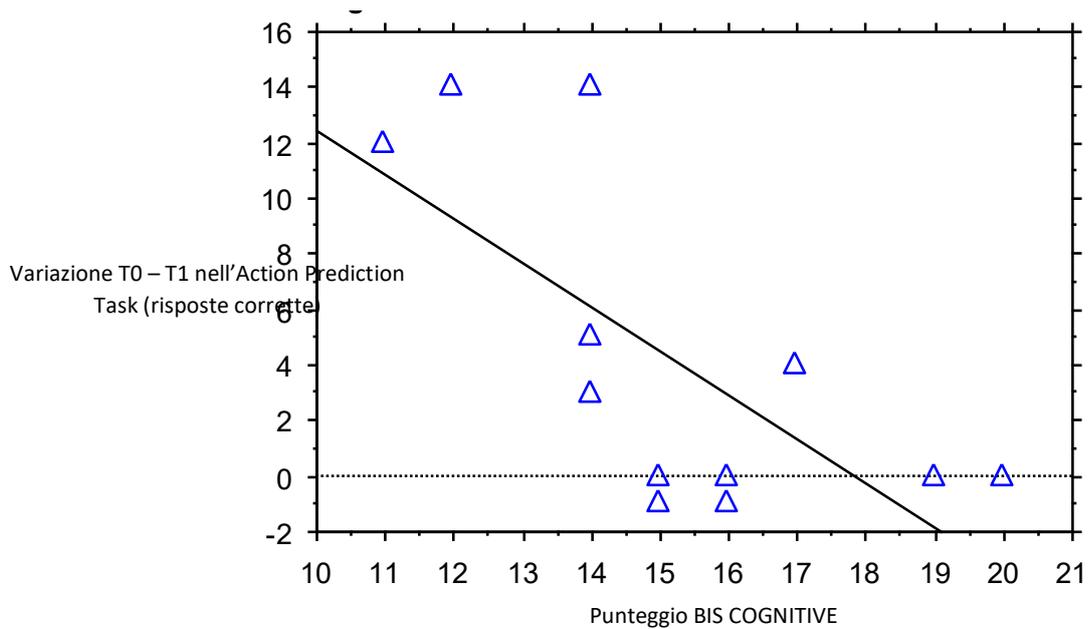


Figura 45. Correlazione tra il miglioramento dell'Action Prediction task (n° di risposte corrette) dopo a-tDCS e il punteggio BIS COGNITIVO.

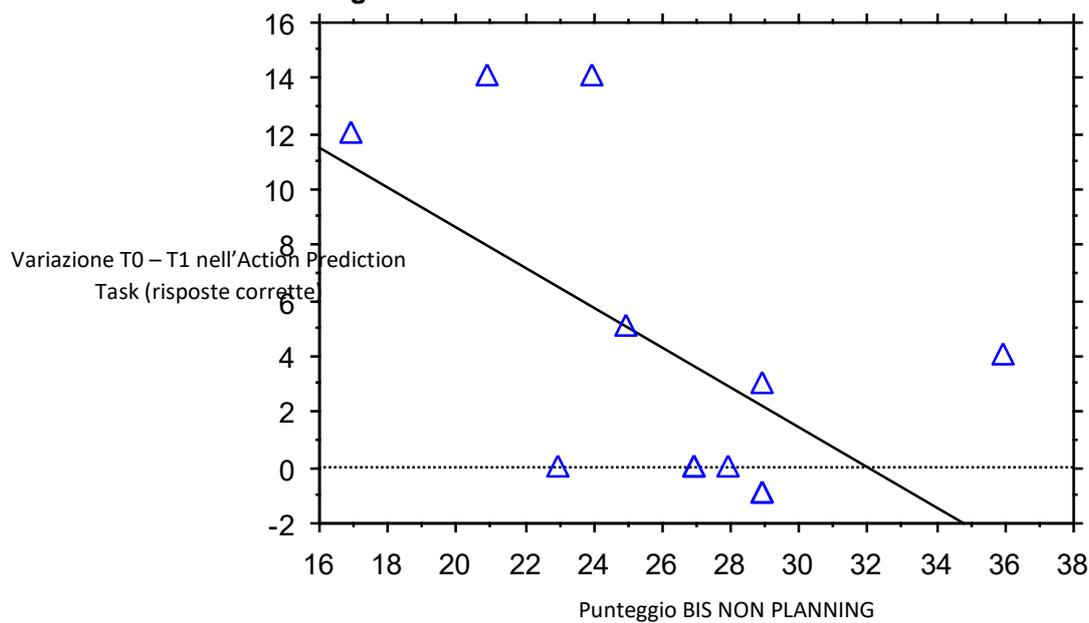


Figura 46. Correlazione tra il miglioramento dell'Action Prediction task (n° di risposte corrette) dopo a-tDCS e il punteggio BIS NON PLANNING.

Tabelle

Table 1. Clinical variables of the cognitive-behavioural-affective profile of the enrolled subjects.

	MEAN	SD (±)	MIN	MAX	MEDIAN	IQR
AGE (YEARS)	22,4	3,4	18	29	22	2,5
EDUCATION (YEARS)	15,4	2,07	13	19	16	2,5
VOLLEYBALL PRACTISE (YEARS)	14,4	4,65	9	22	16	13
MOCA	28,8	0,9	26	28	27	1,75
HARS	6,5	4,4	2	13	4	7,7
BIS	55,8	12,5	44	79	53	16,7
BIS COGNITIVE	13,7	1,9	11	17	14	2,5
BIS MOTOR	18,4	4,15	14	26	17	5
BIS NON PLANNING	22,5	7,4	16	36	20	10,5
PSQI_SLEEP QUALITY	0,5	0,5	0	1	1	1
PSQI_SLEEP LATENCY	0,4	0,7	0	2	0	0,7
PSQI_SLEEP DURATION	0,1	0,3	0	1	0	0
PSQI_HABITUAL SLEEP EFFICACY	0,1	0,3	0	1	0	0
PSQI_SLEEP DISTURBANCES	0,5	0,5	0	1	1	1
PSQI_MEDICATION	0	0	0	0	0	0
PSQI_DAYTIME DYSFUNCTION	0,4	0,5	0	1	0	1
PSQI_GLOBAL SCORE	2,2	1,1	1	4	2	1,7
SOM_T	49,9	8,2	41,4	65,2	47,3	10,4
OC_T	46,4	4,37	41,3	52,4	48	7,7
IS_T	49,8	5,1	42,5	59,6	48,2	2,8
DEP_T	46	4,4	41,8	52,3	45,3	8,3
ANX_T	44,2	2,4	41,8	47,3	44,5	4,7
HOS_T	49	5,3	42,5	55	50,8	10,4
PHOB_T	46,4	1,7	45,8	50,4	45,8	0
PAR_T	49,3	6,3	42,2	61,2	46	6,6
PSY_T	44,9	1,5	44,4	48,4	44,4	0
GSI_T	46,4	3,6	42,1	51,4	45,7	6,2
PSDI_t	47,1	4	42,3	52,5	47,4	7,5
PST_T	47	4,8	41,4	54,3	46,5	7,9
GT	18,8	9,2	10	32	16	16

SD: Standard deviation, MIN: Minimum, MAX: Maximum, IQR: Interquartile range, MOCA: Montreal Cognitive Assessment, HARS: Hamilton Anxiety Rating Scale, BIS: Barratt Impulsivity Scale, PSQI: Pittsburg Sleep Quality Index, SOM: Somatization trait, OC: Obsessive-compulsive trait, IS: Interpersonal Sensitivity trait, DEP: Depressive trait, ANX: Anxious trait, HOS: Hostile trait, PHOB: Phobic Trait, PAR: Paranoid trait, PSY: Psychotic trait, GSI: Global Severity Index, PSDI: Positive symptoms distress index, PST: Positive symptoms total, GT: Total score

Bibliografia

- Abdelmoula A, Baudry S, Duchateau J. «transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a submaximal contraction of elbow flexors without changing corticospinal excitability.» (2016).
- Afonso J, Mesquita I. «Determinants of block cohesiveness and attack efficacy in high-level women's volleyball.» (2010).
- Agarwal SM, Shivakumar V, Bose A, Subramaniam A, Nawani H, Chhabra H, Kalmady SV, Narayanaswamy JC, Venkatasubramanian G. «Transcranial direct current stimulation in schizophrenia.» (2013).
- Aglioti SM, Cesari P, Romani M, Urgesi C. «Action anticipation and motor resonance in elite basketball players.» 2008 (s.d.).
- Aglioti SM, Pazzaglia M. «Sounds and scents in (social) action.» (2011).
- Ahmedov, S. «Ergogenic effect of acupuncture in sport and exercise: a brief review.» (2010).
- Amadi U, Allman C, Johansen-Berg H, Stagg CJ. «The Homeostatic Interaction Between Anodal Transcranial Direct Current Stimulation and Motor Learning in Humans is Related to GABAA Activity.» (2015).
- Ambrus GG, Chaieb L, Stilling R, Rothkegel H, Antal A, Paulus W. «Monitoring transcranial direct current stimulation induced changes in cortical excitability during the serial reaction time task.» (2016).
- Angius L, Hopker J, Mauger AR. «The Ergogenic Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Exercise Performance.» (2017).
- Angius L, Pageaux B, Hopker J, Marcora SM, Mauger AR. «Transcranial direct current stimulation improves isometric time to exhaustion of the knee extensors.» (2016).
- Ansermet, F. «Biology of freedom. neural plasticity, experience and the unconscious.» (2007).
- Antal A, Alekseichuk I, Bikson M, et al. «Low intensity transcranial electric stimulation: Safety, ethical, legal regulatory and application guidelines.» (2017).
- Ardolino G, Bossi B, Barbieri S, Priori A. «Non-synaptic mechanisms underlie the after-effects of cathodal transcutaneous direct current stimulation of the human brain.» (2005).
- Asli Demirtas T, Andrew M, Pascual-Leone A. «Can non invasive brain stimulation enhance cognition in neuropsychiatric disorders?» (2012).
- Avenanti A, Annella L, Candidi M, Urgesi C, Aglioti SM. «Compensatory plasticity in the action observation network: virtual lesions of STS enhance anticipatory simulation of seen actions.» (2013).
- Avenanti A, Bolognini N, Maravita A, Aglioti SM. «Somatic and motor components of action simulation.» (2007).
- Avenanti A, Coccia M, Ladavas E, Provinciali L, Ceravolo MG. «Low-frequency rTMS promotes use-dependent motor plasticity in chronic stroke: a randomized trial.» (2012).

- Avenanti A, Minio-Paluello I, Bufalari I, Aglioti SM. «The pain of a model in the personality of an onlooker: influence of state-reactivity and personality traits on embodied empathy for pain.» (2009).
- Avenanti A, Paracampo R, Annella L, Tidoni E, Aglioti SM. «Boosting and Decreasing Action Prediction Abilities Through Excitatory and Inhibitory tDCS of Inferior Frontal Cortex.» (2018).
- Avenanti A, Urgesi C. «Understanding 'what' others do: mirror mechanisms play a crucial role in action perception.» (2011).
- Bachtiar V, Near J, Johansen-Berg H, Stagg CJ. «Modulation of GABA and resting state functional connectivity by transcranial direct current stimulation.» (2015).
- Badets A, Blandin Y, Wright DL, Shea CH. «Error detection processes during observational learning.» (2006).
- Banissy MJ, Muggleton NG. «Transcranial direct current stimulation in sports training: potential approaches. *Front Hum Neurosci* 2013;7:129.» (2013).
- Barker AT, Jalinous R, Freeston IL. «Non-invasive magnetic stimulation of human motor cortex.» (1985).
- Bastani A, Jaberzadeh S. «Differential modulation of corticospinal excitability by different current densities of anodal transcranial direct current stimulation.» (2013).
- Bastani A., Jaberzadeh S. «Within-session repeated a-tDCS: the effects of repetition rate and inter-stimulus interval on corticospinal excitability and motor performance.» (2014).
- Battaglia-Mayer A, Archambault PS, Caminiti R. «cortical network for eye-hand coordination and its relevance to understanding motor disorders of parietal patients.» (2006).
- Benton AL VN, Hamsher KS. «Visuospatial judgment: a clinical test.» *Archives of Neurology* (1978).
- Berthelot G, Sedeaud A, Marck A, et al. «Has Athletic Performance Reached its Peak? .» *Sports medicine (Auckland, NZ)*. (2015).
- Bikson M, Grossman P, Thomas C, et al. «Safety of Transcranial Direct Current Stimulation: Evidence Based Update 2016.» (2016).
- Bikson M, Inoue M, Akiyama H, et al. «Effects of uniform extracellular DC electric fields on excitability in rat hippocampal slices in vitro.» (2004).
- Bindman LJ, Lippold OC, Redfearn JW. «THE ACTION OF BRIEF POLARIZING CURRENTS ON THE CEREBRAL CORTEX OF THE RAT (1) DURING CURRENT FLOW AND (2) IN THE PRODUCTION OF LONG-LASTING AFTER-EFFECTS.» (1964).
- Black CB, Wright DL, Magnuson CE, Brueckner S. «Learning to detect error in movement timing using physical and observational practice.» (2005).
- Blakemore SJ, Decety J. «From the perception of action to the understanding of intention.» (2001).
- Boggio PS, Bermanpohl F, Vergara AO, Muniz AL, Nahas FH, Leme PB, Rigonatti SP, Fregni F. *Go-no-go task performance improvement after anodal transcranial DC stimulation of the left dorsolateral prefrontal cortex in major depression*. 2007.

- Boggio PS, Ferrucci R, Rigonatti SP, et al. «Effects of transcranial direct current stimulation on working memory in patients with Parkinson's disease.» (2006).
- Borducchi DM, Gomes JS, Akiba H,. *Transcranial Direct Current Stimulation Effects on Athletes' Cognitive Performance: An Exploratory Proof of Concept Trial. Frontiers in psychiatry.* 2016.
- Boros K, Poreisz C, Munchau A, Paulus W, Nitsche MA. «Premotor transcranial direct current stimulation (tDCS) affects primary motor excitability in humans.» (2008).
- Borrioni P, Montagna M, Cerri G, Baldissera F. «Cyclic time course of motor excitability modulation during the observation of a cyclic hand movement.» (2005).
- Boyer E, Miltenberger RG, Batsche C, Fogel V. «Video modeling by experts with video feedback to enhance gymnastics skills.» (2009).
- Broadbent DP1, Causer J, Williams AM, Ford PR. «Perceptual-cognitive skill training and its transfer to expert performance in the field: future research directions.» (2015).
- Brunoni AR, Amadera J, Berbel B, Volz MS, Rizzerio BG, Fregni F. «A systematic review on reporting and assessment of adverse effects associated with transcranial direct current stimulation.» (2011).
- Buchtel, H. A. «On defining neural plasticity.» (1978).
- Buneo CA, Andersen RA. «The posterior parietal cortex: sensorimotor interface for the planning and online control of visually guided movements.» (2006).
- Buyse DJ, Reynolds CF, Monk TH, Berman SR, Kupfer DJ. «The Pittsburgh Sleep Quality Index: a new instrument for psychiatric practice and research.» (1989).
- Candidi M, Sacheli LM, Mega I, Aglioti SM. «Somatotopic mapping of piano fingering errors in sensorimotor experts: TMS studies in pianists and visually trained musically naives.» (2014).
- Candidi M, Stienen BM, Aglioti SM, de Gelder B. «Event-related repetitive transcranial magnetic stimulation of posterior superior temporal sulcus improves the detection of threatening postural changes in human bodies.» (2011).
- Candidi M, Vicario CM, Abreu AM, Aglioti SM. «Competing mechanisms for mapping action-related categorical knowledge and observed actions.» (2010).
- Cantarero G, Spampinato D, Reis J, et al. «Cerebellar direct current stimulation enhances on-line motor skill acquisition through an effect on accuracy.» (2015).
- Cardellicchio P, Hilt PM, Olivier E, Fadiga L, D'Ausilio A. «Early modulation of intra-cortical inhibition during the observation of action mistakes.» (2019).
- Caspers S, Zilles K, Laird AR, Eickhoff SB. «meta-analysis of action observation and imitation in the human brain.» (2010).
- Catmur C, Mars RB, Rushworth MF, Heyes C. «Making mirrors: premotor cortex stimulation enhances mirror and counter-mirror motor facilitation.» (2011).
- Cattaneo L, Voss M, Brochier T, Prabhu G, Wolpert DM, Lemon RN. «A cortico-cortical mechanism mediating object-driven grasp in humans.» (2005).

- Catteeuw P, Helsen W, Gilis B, Wagemans J. «Decision-making skills, role specificity, and deliberate practice in association football refereeing.» (2009).
- Cheeran B, Cohen L, Dobkin B, et al. «The future of restorative neurosciences in stroke: driving the translational research pipeline from basic science to rehabilitation of people after stroke.» (2009).
- Chisari C, Fanciullacci C, Lamola G, Rossi B, Cohen LG. «NIBS-driven brain plasticity.» (2014).
- Chong TT, Cunnington R, Williams MA, Kanwisher N, Mattingley JB. «fMRI adaptation reveals mirror neurons in human inferior parietal cortex.» (2008).
- Ciechanski P, Kirton A. «Transcranial Direct-Current Stimulation Can Enhance Motor Learning in Children.» (2017).
- Clark VP, Coffman BA, Mayer AR, et al. «TDCS guided using fMRI significantly accelerates learning to identify concealed objects.» (2012).
- Cogiமானian F, Marceglia S, Ardolino G, Barbieri S, Priori A. «Improved isometric force endurance after transcranial direct current stimulation over the human motor cortical areas.» (2007).
- Cohen Kadosh R, Levy N, O'Shea J, Shea N, Savulescu J. The neuroethics of non-invasive brain stimulation. «2012.» (s.d.).
- Cohen LG, Celnik P, Pascual-Leone A, et al. «Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans.» (1997).
- Collingridge GL, Bliss TV. «A synaptic model of memory: long-term potentiation in the hippocampus.» (1993).
- Convento S, Bolognini N, Fusaro M, Lollo F, Vallar G. «Neuromodulation of parietal and motor activity affects motor planning and execution.» (2014).
- Cooke SF, Bliss TV. «Plasticity in the human central nervous system.» (2006).
- Cramer SC, Sur M, Dobkin BH, et al. «Harnessing neuroplasticity for clinical applications.» (2011).
- Crewther BT, Carruthers J, Kilduff LP, Sanctuary CE, Cook CJ. «Temporal associations between individual changes in hormones, training motivation and physical performance in elite and non-elite trained men.» (2016).
- Cuypers K, Leenus DJ, van den Berg FE, et al. «Is motor learning mediated by tDCS intensity?» (2013).
- D'Ausilio A, Bufalari I, Salmas P, Fadiga L. «The role of the motor system in discriminating normal and degraded speech sounds.» (2012).
- Davare M, Montague K, Olivier E, Rothwell JC, Lemon RN. «Ventral premotor to primary motor cortical interactions during object-driven grasp in humans.» (2009).
- Dayan E, Cohen LG. «Neuroplasticity subserving motor skill learning.» (2011).
- Dayan E., Censor N., Buch ER., Sandrini M., Cohen LG. «Noninvasive brain stimulation: from physiology to network dynamics and back.» (2013).

- de Lima AL, Braga FMA, da Costa RMM, Gomes EP, Brunoni AR, Pegado R. «Transcranial direct current stimulation for the treatment of generalized anxiety disorder: A randomized clinical trial.» (2019).
- Debaere F, Wenderoth N, Sunaert S, Van Hecke P, Swinnen SP. «Changes in brain activation during the acquisition of a new bimanual coordination task.» (2004).
- Derogatis LRS, Kathryn L. *The SCL-90-R and the Brief Symptom Inventory (BSI) in Primary Care*. 2000.
- Derogatis, Leonard R. *Symptom Checklist-90-R: Administration, scoring, and procedures manual (3rd ed.)*. 1994.
- Desmet C, Brass M. *Observing accidental and intentional unusual actions is associated with different subregions of the medial frontal cortex*. 2015.
- Desmet C, Deschrijver E, Brass M. «How social is error observation? The neural mechanisms underlying the observation of human and machine errors.» (2014).
- Dimyan MA, Cohen LG. «Neuroplasticity in the context of motor rehabilitation after stroke.» (2011).
- Donnarumma, F., Costantini, M., Ambrosini, E., Friston, K. & Pezzulo, G. «Action perception as hypothesis testing.» (2017).
- Drevets, WC. «Neuroimaging studies of mood disorders.» (2000).
- Dum RP, Strick PL. «The origin of corticospinal projections from the premotor areas in the frontal lobe.» (1991).
- Duque J, Davare M, Delaunay L, et al. «Monitoring coordination during bimanual movements: where is the mastermind?» (2010).
- Etzel JA, Gazzola V, Keysers C. «Testing simulation theory with cross-modal multivariate classification of fMRI data.» (2008).
- Fadiga L, Craighero L, Olivier E. «Human motor cortex excitability during the perception of others' action.» (2005).
- Farrow D, Abernethy B, Jackson RC. «Probing expert anticipation with the temporal occlusion paradigm: experimental investigations of some methodological issues.» (2005).
- Faubert. «Professional athletes have extraordinary skills for rapidly learning complex and neutral dynamic visual scenes.» (2013).
- Faul F, Erdfelder E, Lang AG, Buchner A. «G*Power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences.» (2007).
- Fazio P, Cantagallo A, Craighero L, et al. «Encoding of human action in Broca's area.» (2009).
- Fecteau S, Pascual-Leone A, Zald DH, et al. «Activation of prefrontal cortex by transcranial direct current stimulation reduces appetite for risk during ambiguous decision making.» (2007).
- Fery YA, Ponsérre S. «Enhancing the control of force in putting by video game training.» (2001).
- Fitz NS, RP. «The perils of using electrical stimulation to change human brains. In the Stimulated Brain: Cognitive Enhancement Using non-invasive Brain Stimulation.» (2014).

- Flood A, Waddington G, Keegan RJ, Thompson KG, Cathcart S. «The effects of elevated pain inhibition on endurance exercise performance.» (2017).
- Fogassi L, Ferrari PF, Gesierich B, Rozzi S, Chersi F, Rizzolatti G. «Parietal lobe: from action organization to intention understanding.» (2005).
- Fourkas AD, Bonavolonta V, Avenanti A, Aglioti SM. «Kinesthetic imagery and tool-specific modulation of corticospinal representations in expert tennis players.» (2008).
- Fregni F, Boggio PS, Nitsche MA, Rigonatti SP. *Cognitive effects of repeated sessions of transcranial direct current stimulation in patients with depression.* 2014.
- Friston K, Mattout J, Kilner J. «Action understanding and active inference.» (2011).
- Friston KJ, Frith CD. *Active inference, communication and hermeneutics cortex: a journal devoted to the study of the nervous system and behaviour.* 2015.
- Fritsch B, Reis J, Martinowich K, et al. «Direct current stimulation promotes BDNF-dependent synaptic plasticity: potential implications for motor learning.» (2010).
- Furuya S, Klaus M, Nitsche MA, Paulus W, Altenmuller E. «Ceiling effects prevent further improvement of transcranial stimulation in skilled musicians.» (2014).
- Galea JM, Jayaram G, Ajagbe L, Celnik P. «Modulation of cerebellar excitability by polarity-specific noninvasive direct current stimulation.» (2009).
- Gangitano M, Mottaghy FM, Pascual-Leone A. «Modulation of premotor mirror neuron activity during observation of unpredictable grasping movements.» (2004).
- Garcia AM, Ibanez A. «A touch with words: Dynamic synergies between manual actions and language.» (2016).
- Garcia-Gonzales L, Dominguez AM, Gil A, Moreno MP. «Effects of Decision Training on Decision Making and Performance in Young Tennis Players: An Applied Research.» (2014).
- Gazzola V, Keysers C. «The observation and execution of actions share motor and somatosensory voxels in all tested subjects: single-subject analyses of unsmoothed fMRI data.» (2009).
- Gerschlagel W, Siebner HR, Rothwell JC. «Decreased corticospinal excitability after subthreshold 1 Hz rTMS over lateral premotor cortex.» (2001).
- Gross J, Timmermann L, Kujala J, et al. «The neural basis of intermittent motor control in humans.» (2002).
- Grossman ED, Battelli L, Pascual-Leone A. «Repetitive TMS over posterior STS disrupts perception of biological motion.» (2005).
- Habel U, Klein M, Kellermann T, Shah NJ, Schneider F. «Same or different? Neural correlates of happy and sad mood in healthy males.» (2005).
- Hadj-Bouziane F, Frankowska H, Meunier M, Coquelin PA, Boussaoud D. «Conditional visuo-motor learning and dimension reduction.» (2006).
- Hadlow SM, Panchuk D, Mann DL, Portus MR, Abernethy B. «Modified perceptual training in sport: A new classification framework.» (2018).

- Hagemann N, Strauss B, Cañal-Bruland R. «Training perceptual skill by orienting visual attention.» (2006).
- Hallock H, Collins D, Lampit A, Deol K, Fleming J, Valenzuela M. «Cognitive Training for Post-Acute Traumatic Brain Injury: A Systematic Review and Meta-Analysis.» (2016).
- Hamilton R, Messing S, Chatterjee A. «Rethinking the thinking cap: ethics of neural enhancement using noninvasive brain stimulation.» (2011).
- Hardwick RM, Rottschy C, Miall RC, Eickhoff SB. «quantitative meta-analysis and review of motor learning in the human brain.» (2013).
- Harris DJ, Wilson MR, Vine SJ. «A Systematic Review of Commercial Cognitive Training Devices: Implications for Use in Sport.» (2018).
- Harteis C, Koch T, Morgenthaler B. «How intuition contributes to high performance: An educational perspective.» (2008).
- Hasan A, Bergener T, Nitsche MA, Strube W, Bunse T, Falkai P, Wobrock T. *Impairments of motor-cortex responses to unilateral and bilateral direct current stimulation in schizophrenia.* 2013.
- Hazime FA, da Cunha RA, Soliaman RR, et al. «ANODAL TRANSCRANIAL DIRECT CURRENT STIMULATION (TDCS) INCREASES ISOMETRIC STRENGTH OF SHOULDER ROTATORS MUSCLES IN HANDBALL PLAYERS.» (2017).
- Herrington JD, Mohanty A, Koven NS, Fisher JE, Stewart JL, Banich MT, Webb AG, Miller GA, Heller W. «Emotion-modulated performance and activity in left dorsolateral prefrontal cortex.» (2005).
- Hickok. «Eight problems for the mirror neuron theory of action understanding in monkeys and humans.» (2011).
- Hill NT, Mowszowski L, Naismith SL, Chadwick VL, Valenzuela M, Lampit A. «Computerized Cognitive Training in Older Adults With Mild Cognitive Impairment or Dementia: A Systematic Review and Meta-Analysis.» (2017).
- Hirao T, Masaki H. «Modulation of Spatial Attentional Allocation by Computer-Based Cognitive Training during Lacrosse Shooting Performance.» (2017).
- Hopwood M, Mann DL, Farrow D, Nielsen T. «Does visual-perceptual training augment the fielding performanc of skilled cricketers?» (2011).
- Huang VS, Shadmehr R. «Evolution of motor memory during the seconds after observation of motor error.» (2007).
- Huang YZ, Edwards MJ, Rounis E, Bhatia KP, Rothwell JC. «Theta burst stimulation of the human motor cortex.» (2005).
- Hummel FC, Heise K, Celnik P, Floel A, Gerloff C, Cohen LG. «Facilitating skilled right hand motor function in older subjects by anodal polarization over the left primary motor cortex.» (2010).
- Hunter MA, Coffman BA, Gasparovic C, Calhoun VD, Trumbo MC, Clark VP. «Baseline effects of transcranial direct current stimulation on glutamatergic neurotransmission and large-scale network connectivity.» (2015).

- Hupe JM, James AC, Payne BR, Lomber SG, Girard P, Bullier J. «Cortical feedback improves discrimination between figure and background by V1, V2 and V3 neurons.» (1998).
- IGMKA, PhD. «Neuropsychological Assessment of Neuropsychiatric and Neuromedical Disorders.» (2009).
- James., William. «Principles of psychology Macmillan.» (1890).
- Jantzen KJ, Oullier O, Scott Kelso JA. «Neuroimaging coordination dynamics in the sport sciences.» (2008).
- Jarraya M, Chtourou H, Aloui A, et al. «The Effects of Music on High-intensity Short-term Exercise in Well Trained Athletes.» (2012).
- Jellema T, Perrett DI. «Cells in monkey STS responsive to articulated body motions and consequent static posture: a case of implied motion? .» (2003).
- Johansson. «Brain plasticity in health and disease.» (2004).
- Kamali AM, Saadi ZK. «Transcranial direct current stimulation to enhance athletic performance outcome.» (2019).
- Kan B, Dundas JE, Nosaka K. «Effect of transcranial direct current stimulation on elbow flexor maximal voluntary isometric strength and endurance.» (2013).
- Kang EK, Paik NJ. «Effect of a tDCS electrode montage on implicit motor sequence learning in healthy subjects.» (2011).
- Kantak SS, Mummidisetty CK, Stinear JW. «Primary motor and premotor cortex in implicit sequence learning--evidence for competition between implicit and explicit human motor memory systems.» (2012).
- Karok S, Witney AG. «Enhanced motor learning following task-concurrent dual transcranial direct current stimulation.» (2013).
- Katwala, Amit. *The athletic brain: how neuroscience is revolutionising sport and can help you perform better.* 2016.
- Keshavan MS, Vinogradov S, Rumsey J, Sherrill J, Wagner A. «Cognitive training in mental disorders: update and future directions. The American journal of psychiatry.» (2014).
- Keysers C, Perrett DI. «Demystifying social cognition: a Hebbian perspective.» (2004).
- Kidgell DJ, Goodwill AM, Frazer AK, Daly RM. «Induction of cortical plasticity and improved motor performance following unilateral and bilateral transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex.» (2013).
- Kilner JM, Friston KJ, Frith CD. «Predictive coding: an account of the mirror neuron system.» (2007).
- Kilner JM, Neal A, Weiskopf N, Friston KJ, Frith CD. «Evidence of mirror neurons in human inferior frontal gyrus.» (2009).
- Kilner JM, Vargas C, Duval S, Blakemore SJ, Sirigu A. «Motor activation prior to observation of a predicted movement.» (2004).
- Koch G, Caltagirone C. «Non-invasive brain stimulation: From brain physiology to clinical.» (2019).

- Koch G, Versace V, Bonni S, et al. «Resonance of cortico-cortical connections of the motor system with the observation of goal directed grasping movements. .» (2010).
- Kolb B., Gibb R. «Brain plasticity and behaviour in the developing brain.» (2011).
- Kolb B., Harker A., Gibb R. «Principles of plasticity in the developing brain.» (2017).
- Konorski, Jerzy. «Conditioned reflexes and neuronal organization.» (1948).
- Koster-Hale J, Saxe R. *Theory of mind: a neural prediction problem*. 2013.
- Kraskov A, Dancause N, Quallo MM, Shepherd S, Lemon RN. «Corticospinal neurons in macaque ventral premotor cortex with mirror properties: a potential mechanism for action suppression?» (2009).
- Krause B, Cohen Kadosh R. «Can transcranial electrical stimulation improve learning difficulties in atypical brain development? A future possibility for cognitive training.» (2013).
- Krause V, Meier A, Dinkelbach L, Pollok B. «Beta Band Transcranial Alternating (tACS) and Direct Current Stimulation (tDCS) Applied After Initial Learning Facilitate Retrieval of a Motor Sequence.» (2016).
- Krishnan C, Ranganathan R, Kantak SS, Dhaher YY, Rymer WZ. «Anodal transcranial direct current stimulation alters elbow flexor muscle recruitment strategies.» (2014).
- Kummer A, Cardoso F, Teixeira AL. «Generalized anxiety disorder and the Hamilton Anxiety Rating Scale in Parkinson's disease.» (2010).
- Kuo MF, Unger M, Liebetanz D, et al. «Limited impact of homeostatic plasticity on motor learning in humans.» (2008).
- Lampit A, Hallock H, Valenzuela M. «Computerized cognitive training in cognitively healthy older adults: a systematic review and meta-analysis of effect modifiers.» (2014).
- Lattari E, Andrade ML, Filho AS, et al. «Can Transcranial Direct Current Stimulation Improve the Resistance Strength and Decrease the Rating Perceived Scale in Recreational Weight-Training Experience?» (2016).
- Laubach M, Caetano MS, Narayanan NS. «mistakes were made: neural mechanisms for the adaptive control of action initiation by the medial prefrontal cortex.» (2015).
- Leach RC, McCurdy MP, Trumbo MC, Matzen LE, Leshikar ED. «Differential Age Effects of Transcranial Direct Current Stimulation on Associative Memory.» (2018).
- Leung IH, Walton CC, Hallock H, Lewis SJ, Valenzuela M, Lampit A. «Cognitive training in Parkinson disease: A systematic review and meta-analysis. Neurology.» (2015).
- Li LM, Uehara K, Hanakawa T. «The contribution of interindividual factors to variability of response in transcranial direct current stimulation studies.» (2015).
- Liebetanz D, Nitsche MA, Tergau F, Paulus W. «Pharmacological approach to the mechanisms of transcranial DC-stimulation-induced after-effects of human motor cortex excitability.» (2002).
- Liew SL, Santarnecchi E, Buch ER, Cohen LG. «Non-invasive brain stimulation in neurorehabilitation: local and distant effects for motor recovery.» (2014).

- Lopez-Alonso V, Cheeran B, Rio-Rodriguez D, Fernandez-Del-Olmo M. «Inter-individual variability in response to non-invasive brain stimulation paradigms.» (2014).
- Lorains M, Ball K, MacMahon C. «An above real time training intervention for sport decision making.» (2013).
- MacLeod CM, and Dunbar, K. «Training and Stroop-like interference: evidence for a continuum of automaticity.» (1988).
- Mangine GT, Hoffman JR, Wells AJ, et al. «Visual tracking speed is related to basketball-specific measures of performance in NBA players.» (2014).
- Mann DT., Williams AM., Ward P., Janelle CM. «Perceptual-cognitive expertise in sport: a meta-analysis.» *Journal of sport & exercise psychology* (2007).
- Marchal-Crespo L, Michels L, Jaeger L, López-Olóriz J, Riener R. «Effect of Error Augmentation on Brain Activation and Motor Learning of a Complex Locomotor Task.» (2017).
- marketsandmarkets.com*. 2017.
- Marteniuk, RG. «Information processing in motor skills.» (1976).
- Maslen H, Douglas T, Cohen Kadosh R, Levy N, Savulescu J. «The regulation of cognitive enhancement devices: extending the medical model.» (2014).
- Matthew S. Stanford, Charles W. Mathias, Donald M. Dougherty, Sarah L. Lake, Nathaniel E. Anderson, Jim H. Patton. «Fifty years of the Barratt Impulsiveness Scale: An update and review.» (2009).
- McDowell. «Measuring health: a guide to rating scales and questionnaires.» (2006).
- McPherson SL, Kernodle M. «Mapping two new points on the tennis expertise continuum: tactical skills of adult advanced beginners and entry-level professionals during competition.» (2007).
- Mercado. «Neural and cognitive plasticity: from maps to minds.» (2008).
- Merton PA, Morton HB. «Stimulation of the cerebral cortex in the intact human subject.» (1980).
- Metcalfe J1, Xu J2. «Learning from one's own errors and those of others.» (2018).
- Metcalfe. «Learning from Errors.» (2017).
- Moliadze V, Antal A, Paulus W. «Electrode-distance dependent after-effects of transcranial direct and random noise stimulation with extracephalic reference electrodes.» (2010).
- Moller, AR. «Neural plasticity in tinnitus.» (2006).
- Moreno-Duarte I, Morse LR, Alam M, Bikson M, Zafonte R, Fregni F. «Targeted therapies using electrical and magnetic neural stimulation for the treatment of chronic pain in spinal cord injury.» (2014).
- Moro V, Urgesi C, Pernigo S, Lanteri P, Pazzaglia M, Aglioti SM. «The neural basis of body form and body action agnosia.» (2008).
- Motter JN, Pimontel MA, Rindskopf D, Devanand DP, Doraiswamy PM, Sneed JR. «Computerized cognitive training and functional recovery in major depressive disorder: A meta-analysis.» (2016).

- Mroczek D, Januszkiewicz A, Kawczyński AS, Borysiuk Z, Chmura J. «Analysis of male volleyball players' motor activities during a top level match.» (2014).
- Muthalib M, Kan B, Nosaka K, Perrey S. «Effects of transcranial direct current stimulation of the motor cortex on prefrontal cortex activation during a neuromuscular fatigue task: an fNIRS study.» (2013).
- Nasreddine ZS, Phillips NA, Bedirian V, et al. «Nasreddine ZS, Phillips NA, Bedirian V, et al. The Montreal Cognitive Assessment, MoCA: a brief screening tool for mild cognitive impairment.» *Journal of the American Geriatrics Society* (2005).
- Newman-Norlund RD, Ganesh S, van Schie HT, De Bruijn ER, Bekkering H. «Self-identification and empathy modulate error-related brain activity during the observation of penalty shots between friend and foe.» (2009).
- Nishida K, Koshikawa Y, Morishima Y, Yoshimura M, Katsura K, Ueda S, Ikeda S, Ishii R, Pascual-Marqui R, Kinoshita T. *Pre-stimulus Brain Activity Is Associated With State-Anxiety Changes During Single-Session Transcranial Direct Current Stimulation*. 2019.
- Nishitani N, Avikainen S, Hari R. «Abnormal imitation-related cortical activation sequences in Asperger's syndrome. .» (2004).
- Nishitani N, Hari R. «Viewing lip forms: cortical dynamics.» (2002).
- Nitsche MA, Fricke K, Henschke U, et al. «Pharmacological modulation of cortical excitability shifts induced by transcranial direct current stimulation in humans.» (2003).
- Nitsche MA, Jakoubkova M, Thirugnanasambandam N, et al. «Contribution of the premotor cortex to consolidation of motor sequence learning in humans during sleep.» (2010).
- Nitsche MA, Paulus W. «Sustained excitability elevations induced by transcranial DC motor cortex stimulation in humans.» (2001).
- Nitsche MA, Schauenburg A, Lang N, et al. «Facilitation of implicit motor learning by weak transcranial direct current stimulation of the primary motor cortex in the human.» (2003).
- Nitsche MA, Seeber A, Frommann K, et al. «Modulating parameters of excitability during and after transcranial direct current stimulation of the human motor cortex.» (2005).
- Nitsche MA., Paulus W. «Excitability changes induced in the human motor cortex by weak transcranial direct current stimulation.» (2000).
- North JS., Williams AM., Hodges NJ., Ward P. «Perceiving patterns in dynamic action sequences.» (2009).
- Nowak L, Bregestovski P, Ascher P, Herbert A, Prochiantz A. «Magnesium gates glutamate-activated channels in mouse central neurones.» (1984).
- Ohnson-Frey SH, Maloof FR, Newman-Norlund R, Farrer C, Inati S, Grafton ST. «Actions or hand-object interactions? Human inferior frontal cortex and action observation.» (2003).
- Okano AH, Fontes EB, Montenegro RA, et al. «Brain stimulation modulates the autonomic nervous system, rating of perceived exertion and performance during maximal exercise.» (2015).

- Oosterhof NN, Wiggett AJ, Diedrichsen J, Tipper SP, Downing PE. «Surface-based information mapping reveals crossmodal vision-action representations in human parietal and occipitotemporal cortex.» (2010).
- O'Shea J, Johansen-Berg H, Trief D, Gobel S, Rushworth MF. «Functionally specific reorganization in human premotor cortex.» (s.d.).
- Panchuk D, Davids K, Sakadjian A, Macmahon C, Parrington L. «Did you see that? Dissociating advanced visual information and ball flight constrains perception and action processes during one-handed catching.» (2013).
- Papadimitriou K, Pashali E, Sermaki I, Mellas S, Papas M. «The effect of the opponents' serve on the offensive actions of Greek setters in volleyball games.» (2004).
- Park SB, Sung DJ, Kim B, Kim S, Han JK. «Transcranial Direct Current Stimulation of motor cortex enhances running performance.» (2019).
- Pascual-Leone A, Amedi A, Fregni F, Merabet LB. «The plastic human brain cortex.» (2005).
- Pascual-Leone A, Tarazona F, Keenan J, Tormos JM, Hamilton R, Catala MD. «Transcranial magnetic stimulation and neuroplasticity.» (1999).
- Pathologique, Journal de Psychologie Normale et. «Réflexions sur l'usage du concept de plasticité en neurobiologie.» 1976.
- Paulus, W. «Transcranial direct current stimulation (tDCS).» (2003).
- . «Transcranial electrical stimulation (tES - tDCS; tRNS, tACS) methods.» (2011).
- Paus, T. «Inferring causality in brain images: a perturbation approach.» (2005).
- Pazzaglia M, Smania N, Corato E, Aglioti SM. «Neural underpinnings of gesture discrimination in patients with limb apraxia.» (2008).
- Peigneux P, Salmon E, van der Linden M, et al. «The role of lateral occipitotemporal junction and area MT/V5 in the visual analysis of upper-limb postures. .» (2000).
- Pellegrino G, Fadiga L, Fogassi L, Gallese V, Rizzolatti G. «Understanding motor events: a neurophysiological study.» (1992).
- Perrett DI, Xiao D, Barraclough NE, Keysers C, Oram MW. *the future: Natural image sequences produce "anticipatory" neuronal activity and bias perceptual report.* 2009, s.d.
- Pezzetta R, Nicolardi V, Tidoni E, Aglioti SM. «Error, rather than its probability, elicits specific electrocortical signatures: a combined EEG-immersive virtual reality study of action observation.» (2018).
- Phan KL, Wager T, Taylor SF, Liberzon I. «Functional neuroanatomy of emotion: a meta-analysis of emotion activation studies in PET and fMRI.» (2002).
- Pinder RA, Davids K, Renshaw I, Araujo D. «Representative learning design and functionality of research and practise in sport.» (2011).
- Pixa NH, Pollok B. «Effects of tDCS on Bimanual Motor Skills: A Brief Review.» (2018).

- Pixa NH, Steinberg F, Doppelmayr M. «Effects of High-Definition Anodal Transcranial Direct Current Stimulation Applied Simultaneously to Both Primary Motor Cortices on Bimanual Sensorimotor Performance.» (2017).
- Pixa NH, Steinberg F, Doppelmayr M. «High-definition transcranial direct current stimulation to both primary motor cortices improves unimanual and bimanual dexterity.» (2017).
- Pobric G, Hamilton A F. «Action understanding requires the left inferior frontal cortex.» (2006).
- Press C, Heyes C, Kilner JM. «Learning to understand others' actions.» (2011).
- Proverbio AM, Riva F, Zani A. «Observation of static pictures of dynamic actions enhances the activity of movement-related brain areas.» (2009).
- Puttemans V, Wenderoth N, Swinnen SP. «Changes in brain activation during the acquisition of a multifrequency bimanual coordination task: from the cognitive stage to advanced levels of automaticity.» (2005).
- Quartarone A, Lang N, Rizzo V, et al. «Motor cortex abnormalities in amyotrophic lateral sclerosis with transcranial direct-current stimulation.» (2007).
- Quartarone A, Morgante F, Bagnato S, et al. «Long lasting effects of transcranial direct current stimulation on motor imagery.» (2004).
- Raab. «Think SMART, not hard-a review of teaching decision making in sport from ecological rationality perspective.» (2007).
- Rabipour S, Raz A. «Training the brain: fact and fad in cognitive and behavioral remediation.» (2012).
- Radman T, Ramos RL, Brumberg JC, Bikson M. «Role of cortical cell type and morphology in subthreshold and suprathreshold uniform electric field stimulation in vitro.» (2009).
- Rattray B, Argus C, Martin K, Northey J, Driller M. «Is it time to turn our attention toward central mechanisms for post-exertional recovery strategies and performance?» (2015).
- Reis J, Fischer JT, Prichard G, Weiller C, Cohen LG, Fritsch B. «Time- but not sleep-dependent consolidation of tDCS-enhanced visuomotor skills.» (2015).
- Reis J, Schambra HM, Cohen LG, et al. «Noninvasive cortical stimulation enhances motor skill acquisition over multiple days through an effect on consolidation.» (2009).
- Reis J, Swayne OB, Vandermeeren Y, et al. «Contribution of transcranial magnetic stimulation to the understanding of cortical mechanisms involved in motor control.» (2008).
- Renshaw I, Davids K, Araujo D, Lucas A, Roberts WM, Newcombe DJ, Franks B. «Evaluating weaknesses of "perceptual-cognitive training" and "brain training" methods in sports: an ecological dynamics critique.» (2019).
- Schubotz RI. «Prediction of external events with our motor system: towards a new framework.» (2007).
- Rich TA, Pfister R, Alton J, Gerdt D, Baruch M. «Assessment of Cardiovascular Parameters during Meditation with Mental Targeting in Varsity Swimmers.» (2016).
- Rizzolatti G, Cattaneo L, Fabbri-Destro M, Rozzi S. *Cortical mechanisms underlying the organization of goal-directed actions and mirror neuron-based action understanding.* 2014.

- Rizzolatti G, Luppino G. «The cortical motor system. .» (2001).
- Jones RN. «Cognitive Training Improves Cognitive Performance, but What Else?» (2018).
- Romeas T, Guldner A., Faubert J., «3D-multiple object tracking training task improves passing decision-making accuracy in soccer players.» *Psychol Sport Exerc* (2016).
- Rosenkranz K, Nitsche MA, Tergau F, Paulus W. «Diminution of training-induced transient motor cortex plasticity by weak transcranial direct current stimulation in the human.» (2000).
- Rowe R, McKenna F. «Skilled anticipation in real-world tasks: measurement of attentional demands in the domain of tennis.» *Journal of experimental psychology Applied* 2001 (2001): 7:60-67.
- Russell MJ, Goodman T, Pierson R, et al. «Individual differences in transcranial electrical stimulation current density.» (2013).
- Russell MJ, Goodman TA, Visse JM, et al. «Sex and Electrode Configuration in Transcranial Electrical Stimulation.» (2017).
- Sabino-Carvalho JL, Lopes TR, Obeid-Freitas T, et al. «Effect of Ischemic Preconditioning on Endurance Performance Does Not Surpass Placebo.» (2017).
- Sandrini M, Cohen LG. «Noninvasive brain stimulation in neurorehabilitation.» (2013).
- Santaracchi E. BA-K, Levembaum E., Thompson T., Cohen Kadosh R., Pascual-Leone. «Enhancing cognition using transcranial electrical stimulation.» (2015).
- Saucedo Marquez CM, Zhang X, Swinnen SP, Meesen R, Wenderoth N. «Task-specific effect of transcranial direct current stimulation on motor learning.» (2013).
- Savelsbergh GJP, Van Gastel PJ, Van Kampen PM. «Anticipation of penalty kicking direction can be improved by directing attention through perceptual learning.» (2005).
- Saygin, AP. «Superior temporal and premotor brain areas necessary for biological motion perception.» (2007).
- Schambra HM, Abe M, Luckenbaugh DA, Reis J, Krakauer JW, Cohen LG. «Probing for hemispheric specialization for motor skill learning: a transcranial direct current stimulation study.» (2011).
- Schippers MB, Keysers C. «Mapping the flow of information within the putative mirror neuron system during gesture observation.» (2011).
- Schutz-Bosbach S, Avenanti A, Aglioti SM, Haggard P. «Don't do it! Cortical inhibition and self-attribution during action observation.» (2009).
- Schutz-Bosbach S, Prinz W. «Prospective coding in event representation.» (2007).
- Sergerie K, Lepage M, Armony JL. «A face to remember: emotional expression modulates prefrontal activity during memory formation.» (2005).
- Shane MS, Stevens M, Harenski CL, Kiehl KA. «Neural correlates of the processing of another's mistakes: a possible underpinning for social and observational learning.» (2008).
- Shimada S, Abe R. «Modulation of the motor area activity during observation of a competitive game.» (2009).

- Shimazu H, Maier MA, Cerri G, Kirkwood PA, Lemon RN. «Macaque ventral premotor cortex exerts powerful facilitation of motor cortex outputs to upper limb motoneurons.» (2004).
- Simons DJ, Boot WR, Charness N, et al. «Do "Brain-Training" Programs Work?» (2016).
- Slavin MD, Held JM, Basso DM, et al. «Fetal brain tissue transplants and recovery of locomotion following damage to sensorimotor cortex in rats.» (1988).
- Slimani M, Bragazzi NL, Todd D, Dellall A, Hue O, Cheour F, Taylor L. *Do cognitive training strategies improve motor and positive psychological skills development in soccer players? Insight from a systematic review.* 2018.
- Smeeton NJ, Williams AM, Hodges NJ, Ward P. «The relative effectiveness of various instructional approaches in developing anticipation skill.» (2005).
- Smith D, Wright, C., Allsopp., Westhead. «It's all in the mind:PETTLEP-based imagery and sports performance.» (2007).
- Smith-Ray RL, Hughes SL, Prohaska TR, Little DM, Jurivich DA, Hedeker D. «Impact of Cognitive Training on Balance and Gait in Older Adults.» (2015).
- Stagg CJ, Bachtiar V, Johansen-Berg H. «The role of GABA in human motor learning.» (2011).
- Stanford MS MC, Dougherty DM, Lake SL, Anderson NE, and Patton JH. «Fifty years of the Barratt Impulsiveness Scale: An update and review.» (2009).
- Stapel JC, Hunnius S, van Elk M, Bekkering H. «Motor activation during observation of unusual versus ordinary actions in infancy.» (2010).
- Steele JD, Lawrie SM. «Segregated neural representation of distinct emotion dimensions in the prefrontal cortex-an fMRI study.» (2004).
- Stroop, J. R. «Studies of interference in serial verbal reactions.» (1935).
- Swinnen SP, Wenderoth N. «Two hands, one brain: cognitive neuroscience of bimanual skill.» (2004).
- Swinnen, SP. «Intermanual coordination: from behavioural principles to neural-network interactions.» (2002).
- Tanaka S, Hanakawa T, Honda M, Watanabe K. «Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation.» (2009).
- Tanzi, Eugenio. «fatti e le induzioni dell'odierna istologia del sistema nervoso.» (1893).
- Tecchio F, Zappasodi F, Assenza G, et al. «Anodal transcranial direct current stimulation enhances procedural consolidation.» (2010).
- Tidoni E, Borgomaneri S, di Pellegrino G, Avenanti A. «Action simulation plays a critical role in deceptive action recognition.» (2013).
- Ueda K, Okamoto Y, Okada G, Yamashita H, Hori T, Yamawaki S. *Brain activity during expectancy of emotional stimuli: an fMRI study.* 2003.
- Uozumi T, Tamagawa A, Hashimoto T, Tsuji S. «Motor hand representation in cortical area 44.» (2004).

- Urgesi C, Candidi M, Ionta S, Aglioti SM. «Representation of body identity and body actions in extrastriate body area and ventral premotor cortex.» (2007).
- Urgesi C, Maieron M, Avenanti A, Tidoni E, Fabbro F, Aglioti SM. «Simulating the future of actions in the human corticospinal system.» (2010).
- Urgesi C, Moro V, Candidi M, Aglioti SM. «Mapping implied body actions in the human motor system.» (2006).
- Vaccarino AL, Evans KR, Sills TL, Kalali AH. «Symptoms of anxiety in depression: assessment of item performance of the Hamilton Anxiety Rating Scale in patients with depression.» (2008).
- Van Overwalle F, Baetens K. «Understanding others' actions and goals by mirror and mentalizing systems: a meta-analysis.» (2009).
- Vancleef K, Meesen R, Swinnen SP, Fujiyama H. «tDCS over left M1 or DLPFC does not improve learning of a bimanual coordination task.» (2016).
- Vaseghi B, Zoghi M, Jaberzadeh S. «Does anodal transcranial direct current stimulation modulate sensory perception and pain? A meta-analysis study.» (2014).
- Vestberg T, Gustafson R, Maurex L, Ingvar M, Petrovic P. «Executive functions predict the success of top-soccer players. PLoS one.» (2012).
- Vestberg T., Gustafson R., Maurex L., Ingvar M., Petrovic P. «Core executive functions are associated with success in young elite soccer players.» (2017).
- Vickers JN, Livingston LF, Umeris-Bohnert S, Holden D. «Decision training: the effects of complex instruction, variable practice and reduced delayed feedback on the acquisition and transfer of a motor skill.» (1999).
- Vickers. «Perception, Cognition, and Decision Training. The Quiet Eye in Action.» (2007).
- Vines BW, Cerruti C, Schlaug G. «Dual-hemisphere tDCS facilitates greater improvements for healthy subjects' non-dominant hand compared to uni-hemisphere stimulation.» (2008).
- Vital-Durand F., JM. «Aspects of neural plasticity (plasticité nerveuse).» (1975).
- Vitor-Costa M, Okuno NM, Bortolotti H, et al. «Improving Cycling Performance: Transcranial Direct Current Stimulation Increases Time to Exhaustion in Cycling.» (2015).
- Voroslacos M, Takeuchi Y, Brinyiczki K, et al. «Direct effects of transcranial electric stimulation on brain circuits in rats and humans.» (2018).
- Voss MW, Kramer, A. F., Basak, C., Prakash, R. S., and Roberts B. «Are expert athletes "expert" in the cognitive laboratory? A meta-analytic review of cognition and sport expertise.» (2010).
- Walsh. «Is sport the brain's biggest challenge?» (2014).
- Walton CC, Keegan RJ, Martin M, Hallock H. «The Potential Role for Cognitive Training in Sport: More Research Needed.» (2018).
- Walton CC, Mowszowski L, Lewis SJ, Naismith SL. «Stuck in the mud: time for change in the implementation of cognitive training research in ageing?» (2014).
- Wang L, Pan W, Tan J, Liu C, Chen A. «Slowing after Observed Error Transfers across Tasks.» (2014).

- Waters-Metenier S, Husain M, Wiestler T, Diedrichsen J. «Bihemispheric transcranial direct current stimulation enhances effector-independent representations of motor synergy and sequence learning.» (2014).
- Wenderoth N, Debaere F, Sunaert S, Swinnen SP. «Spatial interference during bimanual coordination: differential brain networks associated with control of movement amplitude and direction.» (2005).
- Wexler, A. «The practices of do-it-yourself brain stimulation: implications for ethical considerations and regulatory proposals.» (2016).
- Whitall J, Waller SM, Sorkin JD, et al. «Bilateral and unilateral arm training improve motor function through differing neuroplastic mechanisms: a single-blinded randomized controlled trial.» (2011).
- Williams AM, Burwitz L. «Advance cue utilization in soccer.» (2007).
- Williams AM, Ericsson KA. «Perceptual-cognitive expertise in sport: some considerations when applying the expert performance approach.» (2005).
- Williams AM., Davids K. «Visual search strategy, selective attention, and expertise in soccer.» (1998).
- Williams AM., Ford PR. «'Game intelligence': anticipation and decision making.» (2006).
- Williams AM., Ward P., Smeeton NJ., Allen D. «Developing anticipation skills in tennis using on-court instruction.» (2004).
- Williams PS, Hoffman RL, Clark BC. «Preliminary evidence that anodal transcranial direct current stimulation enhances time to task failure of a sustained submaximal contraction.» (2013).
- Wilson M, Knoblich G. «The case for motor involvement in perceiving conspecifics.» (2005).
- Wolpert DM., Doya K., Kawato M. «Unifying computational framework for motor control and social interaction. Philosophical transactions of the Royal Society of London Series B.» (2003).
- Woods AJ, Antal A, Bikson M, et al. «A technical guide to tDCS, and related non-invasive brain stimulation tools.» (2016).
- Yarrow K, Brown P, Krakauer JW. «Inside the brain of an elite athlete: the neural processes that support high achievement in sports.» (2009).
- Yuste R, Bonhoeffer T. «Morphological changes in dendritic spines associated with long-term synaptic plasticity.» (2001).
- Zhu B, Wang Y, Zhang G, et al. «Acupuncture at KI3 in healthy volunteers induces specific cortical functional activity: an fMRI study.» (2015).
- Ziemann U, Rothwell JC, Ridding MC. «Interaction between intracortical inhibition and facilitation in human motor cortex.» (1996).
- Zilles. «Neuronal plasticity as an adaptive property of the central nervous system.» (1992).
- Zimmerman M, Heise KF, Gerloff C, Cohen LG, Hummel FC. «Disrupting the ipsilateral motor cortex interferes with training of a complex motor task in older adults.» (2014).