



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Psicologia Generale

Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione

Corso di laurea Magistrale in Neuroscienze e Riabilitazione Neuropsicologica

Tesi di laurea Magistrale

Language by hand: un confronto tra popolazioni tipiche e atipiche (Language by hand: a comparison between typically and atypically developing populations)

Relatrice

Prof.ssa/Prof. Eloisa Valenza

Correlatrice esterna

Dott.ssa Sofia Russo

Laureanda: Alice Scatassi

Matricola: 2052271

Anno Accademico 2022/2023

*“Cuore gioisci di quanto rallegra e rattristati per le sventure senza
eccesso; riconosci il ritmo che regola l’uomo”*

Archiloco di Paro

Indice

1	CAPITOLO – LANGUAGE BY HAND.....	7
1.1	LA RELAZIONE TRA IL DOMINIO MOTORIO E IL DOMINIO LINGUISTICO	9
1.1.1	<i>Filogenesi.....</i>	9
1.1.2	<i>Ontogenesi</i>	11
1.2	DAL LINGUAGGIO PARLATO AL LINGUAGGIO SCRITTO.....	14
1.2.1	<i>Aspetti motori della scrittura abile in età adulta</i>	17
1.2.2	<i>Aspetti motori della scrittura in età evolutiva.....</i>	22
1.2.3	<i>Effetti della scrittura manuale in popolazioni a sviluppo tipico</i>	25
1.3	I DISTURBI EVOLUTIVI DELLA SCRITTURA.....	28
1.3.1	<i>Parametri e strumenti per la diagnosi</i>	29
2	CAPITOLO – IL RUOLO DEL RITMO NEL “LANGUAGE BY HAND”	34
2.1	IL PROCESSAMENTO NEURALE DEL RITMO	34
2.2	LA RELAZIONE TRA RITMO E LINGUAGGIO	38
2.2.1	<i>Ritmo e linguaggio parlato.....</i>	38
2.2.2	<i>Ritmo e letto-scrittura</i>	42
2.3	LA RELAZIONE TRA RITMO, SISTEMA MOTORIO E LINGUAGGIO.....	45
2.3.1	<i>Abilità ritmiche nelle traiettorie evolutive atipiche</i>	47
2.4	TRAINING RITMICO-MUSICALI PER LA LETTO-SCRITTURA.....	49
3	LO STUDIO EMPIRICO: L’EFFETTO DELLE ABILITÀ RITMICHE SULLA SCRITTURA MANUALE IN BAMBINI CON DISLESSIA EVOLUTIVA	52
3.1	INTRODUZIONE ALLO STUDIO E DOMANDA DI RICERCA.....	52
3.2	METODO	56
3.2.1	<i>Soggetti</i>	56
3.2.2	<i>Strumenti.....</i>	56
3.2.3	<i>Stimoli.....</i>	57
3.2.4	<i>Procedura</i>	59
3.3	ANALISI DEI DATI	60

3.4	RISULTATI	62
4	DISCUSSIONE	67
4.1	CONCLUSIONI	74
	BIBLIOGRAFIA.....	76

Introduzione

Nel corso dell'ultimo ventennio, la diffusione della prospettiva dell'*Embodied Cognition* all'interno della *Scienza dello Sviluppo*, ha portato ad un crescente interesse per il ruolo della dimensione fisico-corporea nello sviluppo cognitivo. Le abilità motorie, al pari di quelle percettive, attentive e mnestiche, su cui classicamente si è concentrata l'attenzione dei ricercatori, sono da considerarsi come processi di base in grado di influenzare lo sviluppo di abilità cognitive di alto livello come il linguaggio.

Quella tra il sistema motorio e il sistema linguistico può essere considerata una relazione bidirezionale che si esplicita nella scrittura manuale o "language by hand", definibile come un sistema linguistico complesso in cui i naturali processi di maturazione neuromotoria, interagiscono con quelli linguistici e cognitivi (Baldi e Nunzi, 2007).

Recenti linee di ricerca hanno messo in luce la presenza di un altro processo di base che dato lo stretto legame sia con il sistema motorio che con quello linguistico, si inserisce a pieno titolo nella relazione tra i due domini. Si tratta delle abilità ritmiche di base, intese come l'insieme dei processi di percezione, produzione e sincronizzazione del ritmo (Patel, 2021).

Diversi studi evidenziano come le abilità ritmiche emergono precocemente nel corso dello sviluppo, grazie alla dimensione fisico-corporea che contribuisce a veicolare gli stimoli ritmici ambientali, ed evolvono in stretta relazione con il linguaggio supportandone l'acquisizione, sia nel corso della filogenesi che dell'ontogenesi.

Sebbene il ruolo del ritmo nell'acquisizione del linguaggio parlato e della lettura sia stato ampiamente indagato sia in popolazioni tipiche che atipiche, in particolar modo in individui con Dislessia Evolutiva (Goswami, 2009, STF), molta meno attenzione è stata dedicata allo studio delle potenziali relazioni tra le abilità ritmiche e le abilità di scrittura nelle diverse traiettorie evolutive.

Il presente elaborato è stato quindi sviluppato con l'intento di indagare ulteriormente l'associazione tra sistema ritmico, motorio e linguistico, utilizzando la scrittura manuale come possibile mezzo di indagine.

Nel primo capitolo, attraverso un excursus dei principali studi filogenetici e ontogenetici, viene indagata la relazione tra sistema motorio e sistema linguistico. Successivamente, viene approfondita tale relazione all'interno della scrittura manuale, un processo

linguistico complesso che viene presentato nei suoi aspetti evolutivi, neurocognitivi e motori. Infine, vengono introdotti i disturbi neuroevolutivi relativi alla sua acquisizione. Nel secondo capitolo, il focus viene spostato sulle abilità ritmiche, esplorando il loro sviluppo in relazione al sistema motorio e linguistico, sia nella filogenesi che nell'ontogenesi. Verrà dedicata particolare attenzione al loro possibile ruolo nell'acquisizione dell'alfabetizzazione e alla loro funzione all'interno di traiettorie evolutive atipiche che portano ad esiti fenotipici caratterizzati da deficit motori e linguistici.

Nel terzo capitolo viene presentato nel dettaglio lo studio empirico con carattere esplorativo da me condotto, in cui sono stati confrontati gli indici processuali rilevati in un compito di scrittura (*analisi online*), di una popolazione tipica e atipica con Dislessia Evolutiva. Successivamente è stato indagato il ruolo delle abilità ritmiche sensorimotorie e l'effetto di un priming ritmico-musicale sulle abilità di scrittura manuale nel campione atipico.

L'intento finale del presente studio è portare prove a sostegno dell'impatto negativo del deficit temporale, presente nella DE (Goswami, 2009, TSF), su tutta la traiettoria evolutiva del linguaggio che partendo dall'acquisizione del parlato culmina con lo sviluppo delle abilità di letto-scrittura. Questo ci spingerà a considerare l'implementazione di interventi ritmico-musicali come una potenziale strategia di trattamento integrato per i Disturbi della Letto-Scrittura.

1 Capitolo – Language by hand

Il linguaggio è una competenza, biologicamente fondata che consente all'essere umano di comunicare, attraverso una varietà di canali (soprattutto verbale e gestuale), i significati che è in grado di elaborare (Parisi et al., 2000).

Il linguaggio, in passato, è stato considerato come una funzione “unitaria”, ciò ha portato ad attuare una distinzione tra linguaggio parlato, lettura e scrittura che si è rivelata erronea, poiché il linguaggio, sia parlato che scritto, utilizza diversi organi sensoriali (uditivi e visivi) e motori (bocca/orale-motorio e mano/grafo-motorio) (Berninger et al., 2006).

I processi di letto-scrittura, che raggiungono il loro sviluppo attorno ai nove anni, rappresentano quindi il punto di arrivo di una lunghissima traiettoria evolutiva che ha inizio già nell'ultimo trimestre di gravidanza, quando il sistema uditivo è quasi del tutto maturo e consente di percepire alcune caratteristiche tipiche degli stimoli uditivi e linguistici, e culmina con le abilità, appunto, di letto-scrittura. In virtù di ciò è più corretto parlare di quattro sistemi linguistici funzionali:

- “Language by ear” (ascolto dell'input linguistico orale),
- “Language by mouth” (produzione output linguistico orale),
- “Language by eye” (lettura dell'input linguistico scritto),
- “Language by hand” (produzione dell'output linguistico scritto).

Tali sistemi funzionali complessi si basano su processi neurali in parte condivisi e si sviluppano lungo traiettorie evolutive indipendenti ma interconnesse a vari livelli nei diversi stadi dello sviluppo (Berninger et al., 2006).

In sintesi, il linguaggio si configura come un'abilità cognitiva superiore (o “high level”) multidimensionale che, in linea con gli assunti dell'approccio neurocostruttivista (Karmiloff-Smith, 2013), si sviluppa a partire dall'interazione tra differenti processi di base o “low level” e fattori ambientali (Bello et al., 2017).

Oggi ci sono numerose conoscenze in merito ai precursori evolutivi del linguaggio e al suo tempo di comparsa nei bambini con sviluppo tipico e atipico.

Sebbene, già dagli anni '70, tutta una serie di studi abbiano dimostrato come il linguaggio non sia esclusivamente un prodotto di processi e abilità dedicati e specifici di un dominio ma piuttosto attinga a competenze di altri domini, poca attenzione è stata dedicata alla

relazione tra sviluppo del linguaggio e sviluppo motorio, la cui interazione è riscontrabile in modo evidente nella scrittura manuale (o “language by hand”).

È importante ricordare che il linguaggio emerge nei primi due anni di vita del bambino in concomitanza con un'altra grande acquisizione, la locomozione; in questo primissimo periodo di vita, i bambini acquisiscono e affinano tutta una serie di nuove abilità motorie che trasformano radicalmente le loro esperienze con oggetti e persone e impattano su quelle competenze ed esperienze che svolgono un ruolo cruciale nell'emergere della comunicazione e del linguaggio (Iverson, 2010).

Lo scarso interesse per gli aspetti motori del linguaggio è la diretta conseguenza della concettualizzazione di mente e corpo come due entità distinte. Tale assunto, a partire da Cartesio, ha dominato per secoli la cultura occidentale influenzando una delle principali correnti psicologiche, il cognitivismo, il quale ha diffuso due metafore della mente umana, la mente come “computer” e la mente come “sandwich”. Entrambe queste metafore si focalizzano principalmente sui processi cognitivi, a discapito di quelli sensoriali e motori mediati dal corpo.

Come affermato da Rosenbaum (2005) è paradossale che la psicologia, definita come la scienza del comportamento, sia stata per lungo tempo negligente rispetto ad argomenti di studio quali il “movimento” e il “controllo motorio”.

La nuova *Scienza dello sviluppo*, venutasi a creare dopo decenni di ricerca scientifica, ha ribaltato questa visione, abbracciando la teoria dell'*Embodied cognition* (cognizione incarnata) che sottolinea lo stretto legame tra cognizione e dimensione corporea.

All'interno di questo approccio teorico il cervello/mente non viene considerato come un “calcolatore” che opera in maniera isolata, ma piuttosto come un sistema integrato che riceve ed elabora le informazioni ambientali grazie al corpo che funge da filtro. Il suo funzionamento è quindi reso possibile dalle dinamiche interattive tra le diverse aree cerebrali, il corpo e l'ambiente (relazione mente-cervello-corpo). In questo modo, la cognizione non è più solo un processo mentale, ma anche fisico e sensoriale.

In questa prospettiva, lo studio della corporeità, dei suoi limiti e delle interazioni che il corpo intrattiene con l'ambiente circostante è una condizione necessaria per comprendere e studiare lo sviluppo dei processi cognitivi superiori, come lo è il linguaggio (Valenza & Turati, 2019).

1.1 La relazione tra il dominio motorio e il dominio linguistico

La relazione tra il dominio motorio e quello linguistico è presente sia nello sviluppo filogenetico che in quello ontogenetico dell'essere umano, che verranno descritti, separatamente nei prossimi paragrafi.

1.1.1 Filogenesi

Possiamo individuare due tipologie principali di ipotesi sull'origine del linguaggio umano: le ipotesi che sostengono l'origine vocale (Darwin, 1871; Mithen, 2005) e quelle che invece supportano l'origine gestuale (Arbib, 2005; Corballis, 2002).

Le prime ipotesi sono state sviluppate a partire da una serie di studi che hanno individuato analogie tra i richiami vocali di alcune scimmie e il linguaggio umano (Struhsaker, 1967); esse sostengono che il linguaggio articolato abbia avuto origine dall'imitazione e dalla modificazione di suoni naturali nei nostri antenati (Darwin, 1871). Queste teorie presentano però numerosi limiti: le scimmie studiate non sono antropomorfe quindi hanno un funzionamento cognitivo diverso dal nostro, infatti, le vocalizzazioni delle scimmie sono determinate geneticamente mentre il linguaggio umano è in gran parte appreso (Andreola et al., 2020). Inoltre, le basi neurali coinvolte nella produzione vocale sono differenti negli umani e nelle scimmie (Ploog, 2002).

I modelli ad oggi maggiormente accreditati riguardano l'origine gestuale del linguaggio; all'interno di questa cornice teorica troviamo due grandi scuole di pensiero, le teorie *gesture-first* che ritengono la gestualità un precursore del linguaggio verbale e le teorie che invece sostengono un'evoluzione sincronica di gestualità e parola (Adornetti, 2016). Alla base di entrambe le ipotesi vi è la concezione del linguaggio come una performance multimodale che non si lega solo ai suoni ma anche ai gesti (Arbib, 2012; Corballis, 2011).

Le prove a supporto di tali ipotesi consistono in tutta una serie di studi, condotti sui primati, che hanno messo in luce una loro preferenza per la comunicazione gestuale e corporea rispetto a quella vocalica, e come sia soprattutto la comunicazione gestuale dei primati a condividere le caratteristiche fondamentali di quella umana quali la flessibilità, l'intenzionalità e la generatività (Adornetti, 2016).

Anche studi neuroscientifici hanno supportato queste ipotesi, in particolare, la scoperta dei neuroni specchio nei macachi, ossia neuroni in grado di attivarsi sia durante l'esecuzione intenzionale di un movimento che quando si osserva un'altra scimmia o umano eseguirlo (Rizzolatti & Arbib, 1998).

Sono stati localizzati nell'area F5 (corteccia motoria prefrontale) dei macachi che, nel cervello umano, corrisponde all'area 44 di Brodmann; quest'ultima è un importante centro per il controllo dei movimenti complessi delle mani, l'integrazione e l'apprendimento sensomotorio ma anche per l'articolazione del linguaggio (Rizzolatti & Craighero, 2007).

Secondo Arbib (2005) il meccanismo specchio, favorendo la comprensione diretta delle azioni altrui, ha fatto sì che semplici prassie si trasformassero in gesti intenzionali rendendo il cervello degli ominidi *language-ready*. Successivamente, una transizione da un meccanismo specchio per il *grasping* ad un sistema di imitazione per il *grasping* ha svincolato le azioni dall'oggetto (pantomime) rendendole sempre più simboliche, astratte e arbitrarie, dando origine alla comparsa dei proto-segni.

Infine, la ristrutturazione funzionale dell'area di Broca (parte dell'area 44), da area adibita all'elaborazione delle azioni manuali ad area connessa anche alla produzione e comprensione del linguaggio, sarebbe avvenuta attraverso un processo di incorporazione delle vocalizzazioni nel sistema specchio a partire dall'attivazione di alcuni neuroni per le azioni della bocca (Rizzolatti & Craighero, 2007).

In linea con questa ipotesi Kohler et al. (2002) hanno trovato, sempre nell'area F5, neuroni specchio in grado di rispondere anche all'ascolto di suoni associati alle azioni stesse. Questi neuroni specchio "audiovisivi" potrebbero essere alla base dell'aggiunta dei suoni ai gesti.

Nello studio di D'Ausilio et al., (2013) si suggerisce che l'organizzazione gerarchica primitiva dell'azione, disponendo di tutte le caratteristiche basilari richieste dal linguaggio, possa aver fornito gli elementi di base per l'emergere della sintassi e della semantica. In particolare, la ricorsività, considerata la caratteristica principale del linguaggio, sembrerebbe essere emersa dalla capacità di costruire e utilizzare strumenti in quanto risulta rintracciabile già nella produzione di rudimentali strumenti litici nel Paleolitico inferiore (Di Vincenzo & Manzi, 2012).

La capacità di costruire e usare strumenti può quindi rappresentare la fase intermedia che collega azione e linguaggio (D'Ausilio et al., 2013).

In conclusione, è possibile sostenere una sorta di continuità tra la comunicazione manuale e la comunicazione linguistica/verbale, caratterizzata da una transizione all'interno della medesima modalità, quella della gestualità.

1.1.2 Ontogenesi

La relazione tra dominio motorio e linguistico è presente anche nello sviluppo del bambino.

Lo sviluppo di nuove abilità grosso e fino-motorie, nei primi diciotto mesi di vita, fornisce al bambino l'opportunità di acquisire e praticare competenze fondamentali sia per lo sviluppo del linguaggio parlato (Iverson, 2010) che di quello scritto (Barone 2015).

Le acquisizioni grosso motorie che si succedono in questo periodo come il raggiungimento della postura seduta, il gattonare, la stazione eretta e successivamente il camminare danno modo al bambino di esplorare l'ambiente in maniera sempre più attiva. Questa accresciuta capacità esplorativa ha diverse implicazioni, in primo luogo porta il bambino ad ottimizzare i pattern fino-motori, in quanto incentiva a sviluppare ed utilizzare diverse strategie ergonomiche, posturali e cinematiche che saranno "re-inventate" in condizioni diverse da quelle in cui sono state apprese (Barone, 2015). In secondo luogo, aiuta i bambini ad accrescere la conoscenza sull'ambiente e gli oggetti che in esso si possono trovare, favorendo il processo di creazione dei concetti e di associazione parola-referente (Iverson, 2010).

Evidenze empiriche dimostrano che tanto più efficienti e adattive sono le abilità posturali tanto migliori saranno le abilità linguistiche (Travers et al., 2013).

Secondo Iverson (2010), specifiche abilità fino-motorie come il movimento ritmico delle braccia, la manipolazione di oggetti e i gesti referenziali, avrebbero un ruolo cruciale nello sviluppo del linguaggio.

Attorno al sesto/settimo mese di vita compare nei bambini il movimento ritmico delle braccia, esso precede di qualche settimana la comparsa del babbling (Eilers et al., 1993), aumenta in maniera importante durante la lallazione e diminuisce nei "lallatori" esperti. Secondo l'autrice tale movimento rappresenta un'opportunità per praticare la produzione di azioni ritmicamente organizzate e strettamente sincronizzate, ricordiamo che il ritmo è

un aspetto costitutivo del linguaggio parlato (Goswami, 2011) e anche di quello scritto (Pagliarini et al., 2015). Inoltre, il battito delle mani produce un feedback multimodale che facilita la consapevolezza della correlazione tra i propri movimenti e i modelli sonori risultanti.

Le successive acquisizioni grosso-motorie come il gattonare (7-10 mesi), consentono al bambino di incontrare nuovi oggetti e situazioni, mettendosi anche in situazioni di rischio, di conseguenza i genitori, nel tentativo di regolare tale attività esplorativa, aumentano la loro comunicazione vocale e affettiva e cercano di spostare l'attenzione del bambino su un altro oggetto e/o un'altra situazione. Durante questa nuova situazione di interscambio tra adulto e bambino, quest'ultimo sarà motivato a comprendere quale sia il referente proposto dall'adulto, grazie a diversi indici quali i cenni, lo sguardo e il gesto dell'indicare del caregiver, che facilitano tale compito (Iverson, 2010).

L'acquisizione della stazione eretta (9-12 mesi) è invece cruciale per la manipolazione degli oggetti e lo sviluppo della gestualità in quanto consente al bambino di avere libere le mani e di sperimentare nuove modalità d'azione sull'oggetto.

La manipolazione diventa progressivamente sempre più sofisticata consentendo al bambino di notare nuove caratteristiche degli oggetti e quindi di attribuire loro significati più specifici, tutto ciò è fondamentale per la formazione dei concetti e l'apprendimento delle parole. Lo studio di Alcock et al., (2010) mostra come il lessico di cui dispone un bambino per descrivere un oggetto, risulti più accurato quando il medesimo oggetto viene manipolato.

Tra i 12 e i 18 mesi, i bambini migliorano le abilità fino-motorie e sviluppano forme gestuali più complesse chiamate "gesti referenziali o rappresentativi" che oltre ad esprimere un'intenzione comunicativa rappresentano anche un referente (es. aprire e chiudere la mano per dire "ciao") (Iverson, 2010).

Tali gesti apparirebbero più o meno in concomitanza alle prime parole e subirebbero un simile processo di decontestualizzazione simile a quello che si osserva per le prime proto-parole, durante il quale il legame tra azione e referente diviene meno stretto e si estende nello spazio e nel tempo.

Le abilità fini-motorie forniscono quindi ai bambini un'opportunità per praticare la creazione di significato mediante un collegamento più concreto rispetto a quello parola-

referente in quanto portano con sé tutta una serie di feedback percettivi e propriocettivi immediati (Iverson, 2010). Esse, inoltre, supportano la denominazione e il racconto.

Tra i 12 e i 18 mesi il bambino non mostra una netta distinzione nell'uso di gesti e parole, perciò si parla di periodo "bimodale".

Alcuni studi hanno dimostrato che un'altra funzione dei gesti è quella di supportare la transizione dalla produzione di singole parole alla produzione di due o più parole. Si parla di combinazioni cross-modali in cui i gesti possono avere o una funzione di rinforzo rispetto alla parola, oppure una funzione di completamento e quindi aggiungere informazioni (Capone & McGregor, 2004).

Lo studio di Capirci et al., (1996) riporta che il numero di gesti deittici, referenziali e combinatori a 16 mesi è predittivo del numero di parole prodotte a 20 mesi.

In sintesi, il primo repertorio comunicativo del bambino comprende, in egual misura, elementi gestuali e vocali (Lasorsa et al., 2017).

Durante primo anno e mezzo di vita si sviluppano anche i movimenti di "reaching" (movimenti di raggiungimento dell'oggetto) e di "grasping" (movimenti di prensione dell'oggetto), questi movimenti fanno la loro comparsa già attorno al quarto mese e costituiscono un primo abbozzo di coordinazione visuo-motoria. La coordinazione visuo-motoria è un prerequisito fondamentale per lo sviluppo delle abilità fino-motorie coinvolte nella scrittura (Barone, 2015). In questo stesso intervallo di tempo evolutivo cresce, in modo lineare, anche la capacità di apprendere ed eseguire movimenti volontari in sequenza, abilità importanti per lo sviluppo della fluenza della scrittura e della qualità grafica (Blason et al., 2004)

A 18 mesi, a coronamento di tutte queste acquisizioni, i bambini iniziano a pronunciare le prime parole e a impugnare i pastelli per compiere i primi scarabocchi (Berninger et al., 2006).

In sintesi, tutte queste evidenze sottolineano la natura multimodale della comunicazione umana e lo stretto rapporto tra linguaggio e sviluppo motorio, il ruolo di quest'ultimo risulta però "partecipativo" (Iverson, 2010) cioè non è né necessario né sufficiente, per cui, qualora subisse arresti o ritardi, esiste una flessibilità sufficiente nell'organizzazione del sistema per produrre una miriade di possibili traiettorie di sviluppo che portano comunque all'emergere del linguaggio parlato e scritto, anche se in modo non così ottimale. Queste affermazioni trovano riscontro nello studio di Valenza et al., (2019) che

riporta come bambini prescolari con abilità motorie disfunzionali (“goffaggine motoria”) sono soggetti a successive difficoltà linguistiche e di apprendimento, e in studi che documentano la presenza di deficit linguistici in disturbi che si caratterizzano per la presenza di atipie motorie come Autismo (ASD) e Disturbo dello Sviluppo della Coordinazione Motoria (DCD).

1.2 Dal linguaggio parlato al linguaggio scritto

Il lungo processo evolutivo del linguaggio termina con l’acquisizione di due abilità “high level” cruciali per l’essere umano: la lettura e la scrittura.

Benchè questi due comportamenti linguistici complessi sono strettamente relati tra loro i processi mentali coinvolti durante la scrittura sono in parte diversi da quelli coinvolti per leggere. Di seguito verranno approfonditi unicamente i processi coinvolti nella scrittura perché essi saranno oggetto dello studio empirico da me condotto.

La scrittura è l’abilità, tipicamente umana, di convertire le parole dalla veste fonologica del parlato a quella ortografica (Pinton & Tucci, 2017). Con il termine generico “scrittura” ci si riferisce, nello specifico, a tre componenti che sono l’ortografia, la grafia e la capacità di produrre un testo, le prime due abilità rappresentano le basi da consolidare per poter padroneggiare la terza.

L’abilità di scrittura coinvolge numerose abilità cognitive quali l’attenzione e la memoria, componenti visuo-percettive, componenti esecutivo-motorie e componenti linguistiche (LG-ISS, 2022). Secondo Accardo et al. (2013) la scrittura rappresenta la perfetta convergenza tra abilità linguistiche e motorie per cui può essere un ottimo mezzo per studiare la relazione tra questi due domini.

La sua acquisizione è un percorso lento che ha inizio già in età prescolare, subisce i cambiamenti più massicci tra i 5 e i 9 anni e si automatizza attorno ai 10 anni (Berninger et al., 2006), grazie ad un percorso educativo dedicato che necessita di molti passaggi intermedi.

Secondo Ferreiro & Toberosky (1981) la scrittura non deve essere considerata un mero prodotto scolastico ma un oggetto culturale con diverse funzioni sociali, in primis quella di scambio. Essa è il risultato dello sforzo collettivo dell’umanità che ha portato, in paesi diversi, allo sviluppo di sistemi di scrittura differenti come quello idiografico e quello

alfabetico; quest'ultimo che rappresenta il sistema adottato in occidente, si caratterizza per un inventario finito di grafemi che traducono i suoni del parlato secondo regole di corrispondenza diverse nelle varie lingue (Pinton & Tucci, 2017).

In letteratura, sono stati proposti diversi modelli evolutivi per spiegare lo sviluppo della scrittura alfabetica, tra i maggiormente condivisi, ricordiamo quello di Uta Frith (1985) (*Figura 1*) che individua quattro stadi di sviluppo distinti della letto-scrittura: lo stadio logografico, quello alfabetico, ortografico e lessicale.

Nel primo stadio, detto “logografico o pittorico” (4-6 anni), il bambino non possiede ancora una vera e propria capacità di lettura e scrittura ma è in grado di leggere e scrivere alcune parole (es. il proprio nome) sulla base del riconoscimento di attributi percettivi. Il bambino “fotografa” le parole come fossero delle immagini (logogrammi) e le pronuncia pur non conoscendo il valore convenzionale degli elementi.

In questa fase, secondo Ferreiro & Toberosky (1982), i bambini iniziano a sviluppare idee proprie riguardo ai segni grafici a cui sono esposti che non dipendono dall'insegnamento dell'adulto e che consentono loro di discriminare ciò che può e ciò che invece non può essere letto o scritto. Il primo di questi criteri che possiamo definire “organizzativi”, è la distinzione tra materiale “figurativo” che può essere solo interpretato e materiale “non figurativo”; il secondo criterio è quello del “numero minimo di caratteri” secondo il quale è necessario che una parola abbia un numero minimo di lettere (in genere tre) affinché possa essere letta; infine, il terzo criterio è quello della “variazione interna”, per cui, in una traccia scritta, tutti i segni devono essere diversi tra loro.

All'inizio di questa fase, quindi, i bambini non possiedono ancora i presupposti fondamentali del sistema di scrittura, ossia, che tutte le parole pronunciate possono essere scritte e che l'ordine dei costituenti della scrittura corrisponde all'ordine dei suoni percepiti (*Ibidem*).

Ritornando agli stadi della Frith, il secondo è quello “alfabetico o fonologico” (6-7 anni) che si caratterizza per la presenza della consapevolezza fonologica. Il bambino impara a conoscere i costituenti della parola (fonemi) ed è quindi in grado di leggere e scrivere le parole attuando la conversione grafema-fonema e fonema-grafema mediante la via fonologica. Tale meccanismo è però ancora instabile, infatti, sebbene risulti corretto per quelle parole con chiara corrispondenza fonema-grafema (es. cane) non si rivela ancora funzionale per le parole irregolari che cambiano rappresentazione a seconda del contesto

(es. panca vs pancia) o a quelle che contengono fonemi rappresentati da più lettere (es. bagno, sciarpa). Tale stadio, secondo moltissimi autori, sarebbe centrale nell'acquisizione della letto-scrittura in quanto il bambino automatizza il riconoscimento di parti della parola scritta sempre più ampie (grafema, sillabe, prefissi, suffissi, morfemi, parole) (Cornoldi, 2007).

Nel terzo stadio, chiamato "ortografico", il bambino impara gradualmente a riconoscere gli aspetti di regolarità e irregolarità che caratterizzano la mappatura grafema-fonema. Segue, infine, il quarto e ultimo stadio chiamato "lessicale" in quanto il bambino crea un magazzino lessicale che si rivela più veloce ed efficiente di quello fonologico e consente la trascrizione delle parole omofone non omografe (es. hanno vs anno) e la segmentazione del parlato continuo (es. sapore di vino, gusto divino). (Bonaiuti, 2013).

Il modello della Frith è tutt'ora valido e integrabile nella recente teoria psicolinguistica della granularità proposta da Ziegler e Goswami (2005) che considera anche gli effetti modulatori della regolarità del sistema ortografico. Gli autori ritengono che la diversa "trasparenza" delle lingue (coerenza con cui l'ortografia rappresenta la fonologia), rappresenti un vincolo per l'apprendimento della letto-scrittura, in quanto comporta differenze evolutive nella dimensione dei "grani" delle rappresentazioni lessicali e delle strategie di elaborazione.

Diversamente dal modello di Uta Frith (1985), più di recente è stato proposto, da Berninger et al. (2006), un modello evolutivo in cui viene fornita una panoramica dello sviluppo della scrittura focalizzata sul prodotto, ossia al risultato del processo di scrittura e ad alcuni aspetti grafo-motori.

Secondo questi autori, la scrittura è il risultato dell'integrazione di codici ortografici (forma delle lettere), codici fonologici (nomi), e codici grafo-motori (produzione).

Anche in questo caso vengono individuate quattro fasi: le prime due si basano molto sullo sviluppo di capacità percettive e motorie e sulla loro integrazione mentre le ultime due si basano sul coordinamento del linguaggio (nomi delle lettere) e l'atto di scrivere le forme delle lettere dell'alfabeto.

Nella prima fase, attorno ai 18 mesi, i bambini scoprono che i pastelli lasciano un segno sul mondo esterno, iniziano così ad esplorarne l'uso attraverso gli scarabocchi.

Nella seconda fase i bambini iniziano ad imitare gli altri usando i pastelli per realizzare tratti isolati in orizzontale e verticale, linee diagonali e circolari e semplici forme.

Nella terza fase il bambino prescolare impara i nomi delle lettere dell'alfabeto e migliora nel controllo motorio dello strumento grafico iniziando a collegare i punti e le linee del disegno che gli consentiranno di tracciare le forme delle lettere dell'alfabeto. Impara, inoltre, ad imitare le forme delle lettere fatte dagli adulti.

Con il primo anno di scuola primaria, il bambino impara a copiare le forme delle lettere maiuscole e minuscole dell'alfabeto in modo accurato e sa dare loro un nome quando gli vengono presentate in ordine sparso. Inoltre, il bambino impara a scrivere in modo accurato le lettere che gli vengono dettate e a scriverle in ordine alfabetico recuperandole automaticamente e accuratamente dalla memoria. Proprio come l'espressione orale, anche quella scritta procede dallo stadio di lettere a quello di singole parole, alle combinazioni di parole fino a costruzioni più complesse con strutture sintattiche e discorsive genere-specifiche per la scrittura narrativa ed espositiva (Berninger et al., 2006).

In sintesi, il modello della Frith (1985) sottolinea gli aspetti linguistici e l'andamento evolutivo dello sviluppo della scrittura mentre il modello di Berninger (2006) fa riferimento anche ad alcuni aspetti grafo-motori; tuttavia, nessuno dei due modelli analizza gli aspetti visuo-percettivi e visuo-spaziali che insieme alla componente grafo-motoria e linguistica rappresentano dei prerequisiti indispensabili per l'acquisizione della scrittura manuale (Blason et al., 2004).

1.2.1 Aspetti motori della scrittura abile in età adulta

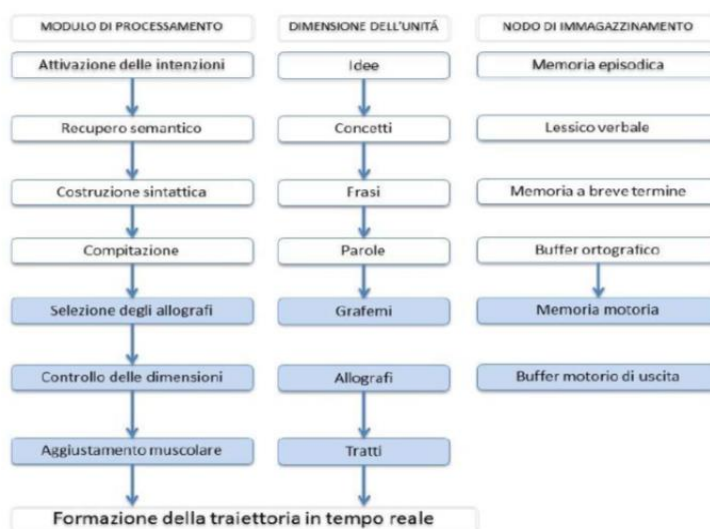


Figura 1 Modello di van Galen et al., 1993 (tratto da LG-ISS, 2022, p. 191)

I modelli di scrittura esperta provenienti dalla neuropsicologia cognitiva (Ellis, 1988; Blason et al., 2004) e quelli provenienti dal campo del controllo motorio (van Galen, 1993), concordano sull'organizzazione modulare gerarchica della scrittura e sulla dissociazione tra processi semantici, sintattici e ortografici di “alto livello” che convergono in una memoria a lungo termine e di lavoro ortografica, e processi motori fini di “basso livello” (Palmis et al., 2017).

Il modello più utilizzato per chiarire i processi motori specifici della scrittura nella popolazione adulta è quello di van Galen (1993) (*Figura 1*).

L'idea centrale di questo modello è che gli allografi (forme delle lettere) sono archiviati nella memoria a lungo termine sotto forma di “programmi motori”.

I programmi motori sono definiti come codici che specificano il numero di unità motorie di base dei grafemi e le loro relazioni spaziotemporali in modo astratto e indipendente dall'effettore.

Dopo che i programmi motori sono stati recuperati, le informazioni sulla parametrizzazione del movimento e sugli aggiustamenti muscolari verrebbero codificate e archiviate in una memoria di lavoro motoria per produrre le traiettorie, la dimensione e l'inclinazione desiderate (*Figura 2*).

L'unità motoria della scrittura è il tratto (stroke), rappresentato da un vettore di velocità e definito come la porzione di traiettoria compresa tra due minimi di velocità assoluti o tra due punti di velocità “verticale” nulla (Hollerbach, 1981). Le lettere e le parole consistono in una successione di tratti.

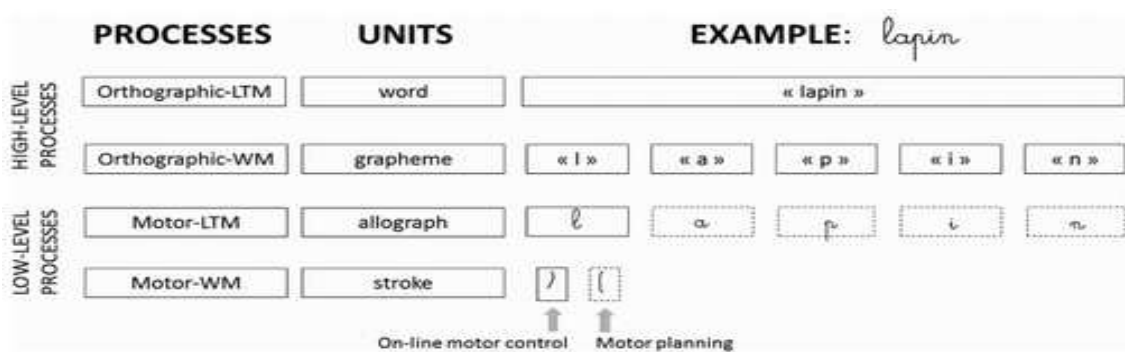


Figura 2 Illustrazione schematica dei diversi processi chiave e delle unità attivate durante la produzione del primo tratto della parola francese “lapin” (coniglio) in corsivo (tratto da Palmis et al., 2017)

La scrittura abile presenta specifiche caratteristiche di prodotto e di processo.

Il prodotto si riferisce alla qualità del segno grafico ovvero all'accuratezza spaziale della traccia scritta che si esplica nella forma, dimensione, inclinazione, spaziatura, disposizione nello spazio del foglio, costanza di riproduzione, aspetto complessivo dei grafemi.

Il processo riguarda invece il movimento che genera questa traccia ossia gli indici cinetico-cinematici come velocità media di scrittura, accelerazione, fluidità, numero di sollevamenti della penna e pause, pressione utilizzata dallo scrittore.

L'indice cinetico-cinematico più importante è la fluidità che non deve essere confusa con la velocità che indica il tempo totale impiegato, o diviso per unità di scrittura definita. La fluidità indica la capacità di scrivere senza dover pensare a come formare o unire le lettere per comporre una parola, perciò riflette l'automatizzazione della scrittura.

Le grafie efficienti risultano leggibili rispetto al prodotto e fluide rispetto al processo.

L'analisi cinematica mostra che la scrittura abile di una parola consiste in una rapida successione di tratti (strokes) discreti eseguiti da rapidi movimenti con molti cambi di direzione, ciascuno separato dal precedente da una leggera pausa, che tipicamente si evidenzia nei punti di naturale curvatura del tratto.

La scrittura a mano è considerata un'attività motoria veloce che può raggiungere una frequenza di circa 5 Hz, tale velocità non è però data dal movimento della penna ma dalla rapida successione di brevi movimenti, come dimostrato da studi in cui la scrittura corsiva risulta più lenta di quella stampata, nonostante i numerosi sollevamenti della penna in quest'ultimo caso (Palmis et al., 2017).

Inoltre, la velocità nei tratti più lunghi è maggiore di quella nei tratti brevi e tende ad aumentare in modo graduale dall'inizio alla fine del tratto, o rimane abbastanza costante, in sostanza gli schemi di movimenti di una scrittura leggibile presentano una scarsa variabilità nel tempo e nello spazio (LG-ISS, 2022, p. 198).

L'alta frequenza limita la possibilità di un controllo basato sulle informazioni sensoriali e impone una modalità di controllo proattiva, basata sull'esecuzione di programmi motori. A sostegno di ciò vi sono una serie di studi che mostrano come i feedback visivi e propriocettivi abbiano un'influenza su aspetti cinematici come la velocità di scrittura e su alcuni aspetti del prodotto come disposizione spaziale globale e l'orientamento delle parole ma non abbiano un effetto rilevante sulla forma delle parole e la leggibilità delle

lettere. Questo si traduce in un'invarianza spaziale e del prodotto al variare del contesto di esecuzione, della dimensione, della velocità di scrittura o dell'effettore usato (Palmis et al., 2017).

Da un punto di vista neurale, la scrittura manuale esperta coinvolge un ampio numero di regioni corticali motorie e sensoriali.

Il sistema motorio è caratterizzato da un'organizzazione gerarchica che può essere suddivisa in quattro sottosistemi fortemente interagenti tra loro. Il primo sottosistema è formato dai motoneuroni inferiori e dagli interneuroni, responsabili dell'esecuzione motoria; il secondo è formato dai motoneuroni superiori localizzati nel tronco encefalico e nella corteccia, i primi sono responsabili del controllo dei movimenti elementari e della postura mentre i secondi si occupano dell'avvio e dell'esecuzione dei movimenti volontari; infine il terzo e quarto sottosistema sono costituiti da circuiti complessi comprendenti il cervelletto e i gangli della base che regolano l'attività dei motoneuroni superiori (Marini, 2018).

Il controllo motorio della scrittura viene implementato a partire da un centro cerebrale contenente i "programmi motori" di scrittura che sono indipendenti dall'effettore. Esso comprende la corteccia premotoria dorsale e ventrale (area di Exner), quella parietale superiore e il cervelletto destro, nell'insieme queste aree formano quella che viene chiamata la "rete motoria della scrittura". Un'altra area che pur non facendo parte di questa rete svolge un ruolo chiave nella scrittura è il giro fusiforme (Palmis et al., 2017) (figura 3).

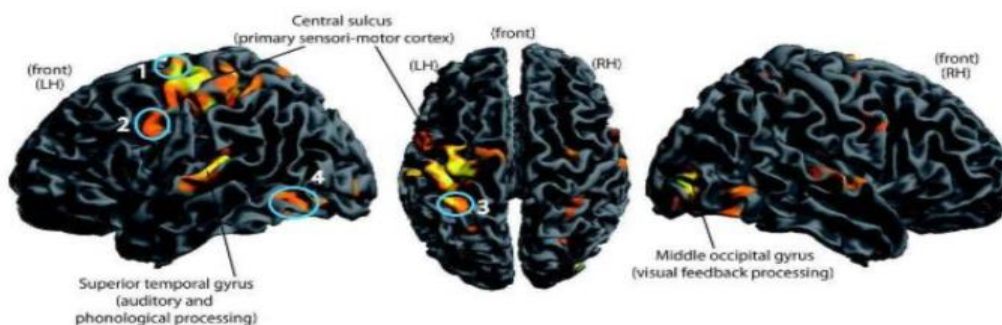


Figura 3 I nodi cruciali del network della scrittura manuale (1. corteccia premotoria dorsale, 2. corteccia premotoria ventrale, 3. corteccia parietale superiore, 4. giro fusiforme) Attivazioni cerebrali durante la scrittura manuale (Longchamp et al., 2005)

La distribuzione di questa rete di scrittura è determinata sia dall'organizzazione iniziale del sistema motorio sia dall'allenamento con un determinato effetto; infatti, nei destrimani il circuito è a sinistra, nei mancini è lateralizzato a destra mentre nei mancini corretti l'attivazione è più bilaterale (Palmis et al., 2017).

L'area di Exner, ossia la giunzione tra il giro precentrale e il solco frontale superiore, interfaccia le rappresentazioni ortografiche e grafemiche e le sequenze complesse di movimento necessarie per produrre lettere e parole; il lobulo parietale superiore è descritto come l'area adibita all'esecuzione di azioni che coinvolgono l'elaborazione visuomotoria e visuospatiale e l'esecuzione delle sequenze di scrittura. Il cervelletto, in particolare la regione destra, è implicato nei primi stadi di apprendimento delle abilità grafo-motorie e ha un ruolo nella ritenzione (Palmis et al., 2017).

L'esatta funzione del cervelletto nel controllo motorio rimane dibattuta, i ricercatori concordano però sul suo coinvolgimento predominante nell'apprendimento motorio e nel mantenimento di tali abilità. Secondo Haggard et al., (1994) il cervelletto favorisce un controllo proattivo dei movimenti di scrittura favorendo la fluidità, l'accuratezza e un'adeguata tempistica dei movimenti. Secondo Manto et al., (2012) esso consentirebbe l'implementazione di modelli inversi per la correzione degli errori nel corso dell'acquisizione e la memorizzazione di modelli interni che consentono un movimento automatico proattivo.

Infine, il giro fusiforme, selettivo per gli stimoli linguistici visivi, conserverebbe le rappresentazioni astratte delle lettere, nello specifico, l'attivazione del giro fusiforme non è determinata dalle caratteristiche motorie, fonologiche o fisiche delle lettere ma dalla loro identità, "A" e "a" producono pattern di attivazione simile mentre "b" e "p" hanno attivazioni diverse pur possedendo caratteristiche fisiche e fonologiche simili.

Le aree sopracitate non sono coinvolte, ad eccezione del giro fusiforme, nei modelli di linguaggio parlato storici che individuano l'"area basilare del linguaggio" nel giro frontale inferiore (area 44 e 45 di Brodmann), nelle aree posteriori del giro temporale superiore e nelle aree posteriori della corteccia temporale inferiore (area 37 di Brodmann, giro temporale inferiore, giro fusiforme) (Marini 2018).

Tuttavia, alcuni studi (Courson et al., 2017) mostrano un coinvolgimento delle aree premotorie (SMA) nell'elaborazione semantica del linguaggio d'azione e il ruolo del cervelletto nel controllo dell'apparato oro-faringeo per determinare la chiarezza del

parlato. Il cervelletto, inoltre, influenza diverse dimensioni linguistiche quali la percezione e il timing del parlato, i processi che coinvolgono la memoria di lavoro verbale, le strategie di sequenziamento nella fluenza verbale, la coordinazione temporale e il richiamo delle rappresentazioni interne implicite delle strutture grammaticali, in funzioni di alto livello come il linguaggio figurativo e l'associazione di parole.

Così come le aree motorie si attivano in compiti linguistici anche le aree linguistiche si attivano in compiti motori (Watkins et al., 2003) a conferma del fatto che i due sistemi lavorano in sinergia tra loro all'interno di networks condivisi.

1.2.2 Aspetti motori della scrittura in età evolutiva

La costruzione e il consolidamento dei programmi motori nella memoria a lungo termine è un processo lungo ed estremamente faticoso, passano infatti diversi anni e migliaia di ore di pratica tra la prima volta che un bambino prende in mano una penna per fare uno scarabocchio e il momento in cui scrive fluentemente una serie di parole.

Nel corso di questa lunga acquisizione le caratteristiche del prodotto e gli indici processuali della scrittura manuale subiscono numerose modifiche.

Nei bambini di 5 anni la grafia risulta poco qualificata, corrisponde ad una successione di tratti imprecisi, prodotti con profili di velocità lenti, molto variabili, con molti arresti, sollevamenti della penna e un maggior numero di aggiustamenti di forza rispetto ai bambini più grandi, suggerendo un minor controllo della forza durante lo svolgimento del medesimo compito.

Attorno ai 7 anni vi è un'evoluzione data dal fatto che il bambino adotta un controllo basato sull'integrazione "on line" di informazioni visive e propriocettive.

A 7-8 anni le dimensioni della scrittura diminuiscono mentre la velocità si mantiene bassa in quanto il movimento della scrittura si basa ancora su feedback visivi online e lo schema motorio non risulta ancora memorizzato.

A 9-10 anni si raggiunge l'automatizzazione della scrittura che può essere spiegata come il risultato del passaggio da un controllo orientato al prodotto (visione della traccia scritta) a uno orientato al processo (gli schemi motori che generano la traccia).

Questa evoluzione porta ad un aumento della leggibilità, della velocità di scrittura e alla diminuzione del numero di minimi di velocità assoluti (contrassegnati da cerchi rossi) (Palmis et al., 2017) (*Figura 4*).

In realtà l'evoluzione del controllo motorio della scrittura non è sempre lineare perciò gli studiosi hanno dibattuto sulla sua natura monotona o non monotona.

Per quanto riguarda il prodotto, vi è un accordo generale sul fatto che la leggibilità non sia monotona, essa sembra aumentare tra gli 8-10 anni e poi subire una diminuzione temporanea, probabilmente legata al fatto che i bambini si allontanano dalle forme standard delle lettere (Mojet, 1991). Per gli indici cinematici l'evoluzione è meno chiara. Tuttavia, differenze significative tra i dodicenni e gli adulti indicano che la scrittura continua a progredire leggermente durante l'adolescenza (Palmis et al., 2017).

Gli aspetti di prodotto e processo sono poi influenzati da fattori ergonomici e posturali come l'impugnatura della matita, l'inclinazione del tronco e la posizione delle spalle (Blason et al., 2004).

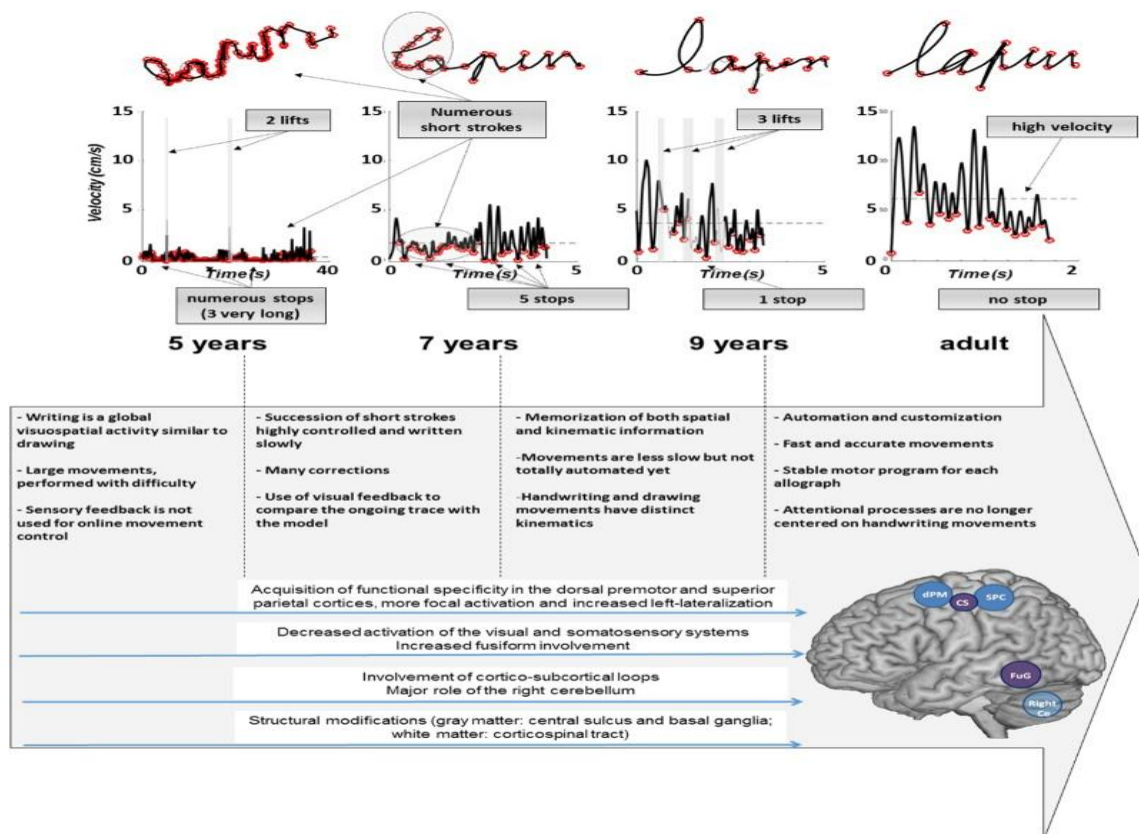


Figura 4 Arco temporale che mostra l'evoluzione della scrittura a mano con l'apprendimento e lo sviluppo (tratto da Palmis et al., 2017)

L'organizzazione cerebrale descritta nel paragrafo precedente per la scrittura abile è il risultato dell'automatizzazione dell'abilità di scrittura, ma cosa succede in un cervello che sta imparando a scrivere?

Attualmente gli studi di neuroimaging condotti durante il periodo in cui si sviluppano le capacità di scrittura sono scarsi. Secondo diversi autori, a livello cerebrale, imparare a scrivere a mano è simile a imparare una nuova abilità motoria complessa come suonare uno strumento musicale (Palmis et al., 2017).

Negli adulti l'apprendimento motorio avviene in due fasi, nella prima si hanno miglioramenti rapidi, in quella tardiva i miglioramenti sono più lenti.

Inizialmente il movimento è guidato dal circuito cortico-cerebellare e risulta lento e impreciso in quanto fa molto affidamento sui feedback, come dimostrato dall'iniziale forte attivazione del sistema visivo. Nel tempo l'abilità motoria si consolida, i movimenti diventano sempre più veloci, accurati e meno dipendenti dal feedback e si raggiunge l'automatizzazione.

Questi cambiamenti sono accompagnati, a livello cerebrale, da uno spostamento dalle aree cerebrali anteriori a quelle più posteriori, evidenziando la diminuzione del controllo esecutivo, della memoria di lavoro e dell'attenzione; inoltre sono stati dimostrati importanti cambiamenti plastici anche nella corteccia motoria primaria quali una maggiore attivazione durante l'esecuzione del compito e una diminuzione delle soglie di eccitabilità nella fase avanzata, riflettendo un reclutamento più efficiente delle unità motorie con l'apprendimento (Palmis et al., 2017).

Non dobbiamo però dimenticare che, nei bambini, abbiamo a che fare con un cervello che è ancora in fase di sviluppo per cui è probabile che l'apprendimento motorio non sia del tutto paragonabile all'apprendimento motorio negli adulti. I bambini tra i 6 e i 10 anni si trovano infatti in una fase di sviluppo neuronale generale, caratterizzata da cambiamenti significativi nella densità della materia grigia e bianca.

In linea con la teoria della plasticità cerebrale, ogni apprendimento, compreso quello motorio, comporta modificazioni cerebrali sia di tipo funzionale (attivazione più localizzata e forte) che strutturale (modificazioni della materia grigia e bianca); a tal proposito, uno studio di neuroimaging (Richards et al., 2011) condotto su bambini tra i 10 e i 12 anni, mostra un'attivazione più focale delle regioni premotoria e cerebellare durante l'apprendimento di nuove forme di lettere nel caso di una buona performance di scrittura, mentre un'attivazione più diffusa e un maggiore coinvolgimento del sistema visivo, della corteccia parietale sinistra e delle regioni extracerebellari, quando le capacità di scrittura sono più scarse. Inoltre, nel caso di lettere familiari, gli scrittori abili mostrano

un'attivazione significativamente più forte del giro fusiforme rispetto agli scrittori inesperti. Da questi risultati, possiamo dedurre che nel processo di acquisizione della scrittura, il bambino impara a mobilitare le risorse neurali in maniera più efficiente.

Studi di neuroimaging condotti da Vinci-Booher & James (2021) mostrano che il sistema neurale della scrittura dell'adulto è in gran parte operativo già a partire dagli 8 anni d'età ma non prima. Infatti, le regioni motorie parietali e frontali non sono ancora di tipo adulto tra i 5 e gli 8 anni di età, possiamo dedurre che il sistema neurale che supporta la scrittura cambi durante i primi anni della scuola elementare.

Attualmente, a causa dei pochissimi studi di neuroimaging durante il periodo in cui si sviluppano le capacità di scrittura, manca un esame dettagliato della specializzazione neurale e delle basi cerebrali del processo sottostante.

La comprensione di come il controllo motorio della scrittura emerge e si stabilizza nel corso dello sviluppo tipico del cervello è tuttavia rilevante per lo studio delle basi neurali della disgrafia evolutiva che verrà affrontata nei prossimi paragrafi.

1.2.3 Effetti della scrittura manuale in popolazioni a sviluppo tipico

Lo stretto legame tra scrittura e lettura (Tressoldi & Cornoldi, 2007) ha portato la letteratura scientifica a trattare il loro apprendimento come complementare e a diffondere, a partire dalla metà degli anni Ottanta, i termini “letto-scrittura” e “alfabetizzazione”.

Lettura e scrittura vengono considerati come processi correlati ma separabili, a conferma del loro legame, studi comportamentali hanno dimostrato che imparare a scrivere può migliorare la percezione e il riconoscimento delle lettere (tra i principali precursori della lettura competente)(Longcamp et al., [2005](#); Qun Guan et al., 2021), l'apprendimento delle pseudolettere (Richards et al., [2011](#)) e la lettura delle parole (Berninger et al., 2006).

Le basi neurobiologiche e le relazioni dirette tra lo sviluppo della scrittura e della lettura non sono ancora ben comprese (Gimenez et al., 2014), tuttavia il crescente utilizzo dei dispositivi digitali, come le tastiere che offrono la possibilità di trascrivere le lettere senza ricorrere alla scrittura manuale, nella vita quotidiana così come a scuola, solleva la questione del loro impatto sull'acquisizione dell'alfabetizzazione.

Cunningham & Stanovich (1990) hanno trovato risultati di ortografia superiori nel gruppo di bambini che scriveva parole usando carta e penna rispetto al gruppo che digitava le lettere su un computer e quello che invece manipolava le tessere delle lettere. Le

conoscenze ortografiche sono necessarie per diventare lettori fluenti ed efficienti, soprattutto in lingue “opache” come il francese e l’inglese.

Sono state proposte diverse interpretazioni di questi risultati. Secondo Longcamp et al. (2006), il vantaggio della scrittura a mano è dovuto al contributo dei programmi motori grafici, costruiti nella memoria attraverso l’esperienza di scrittura. Più precisamente, l’individuazione o meno di una corrispondenza tra la forma percepita e il programma motorio memorizzato potrebbe contribuire ai processi di riconoscimento e quindi spiegare la facilitazione comportamentale per i caratteri appresi mediante la scrittura. Questo processo sarebbe particolarmente utile per le lettere ambigue per il sistema visivo come le lettere speculari (ad esempio, bd o pq) (Seyll & Content, 2021). Questa interpretazione presuppone che le attività congiunte di lettura e scrittura porterebbero gradualmente a una rete multimodale di rappresentazione delle lettere che collega sia i codici motori visivi che quelli grafici. In questa prospettiva della cognizione incarnata, una singola modalità sensoriale è sufficiente per attivare l’intera rete distribuita.

La spiegazione multimodale della rappresentazione delle lettere è supportata da studi di neuroimaging che dimostrano che la percezione visiva delle lettere attiva esattamente la stessa area premotoria impegnata durante la scrittura e che l’attivazione motoria dorsale durante la scrittura correla positivamente con prove di lettura che indagano l’alfabetizzazione (Vinci-boohar & James, 2021).

James & Engelhardt (2012) hanno dimostrato che bambini di 5 anni non alfabetizzati reclutano regioni cerebrali legate al “circuito di lettura”, come il giro fusiforme, la corteccia parietale posteriore e il giro frontale inferiore, durante il riconoscimento delle lettere (precursore della lettura competente), esclusivamente dopo la pratica della scrittura a mano rispetto alla digitazione o al tracciamento.

Lo studio di neuroimaging condotto da Gimenez et al., (2014) su bambini di 5-6 anni che stavano acquisendo la letto-scrittura ha mostrato che una migliore scrittura è associata negativamente all’attivazione e positivamente al volume della materia grigia in una regione della pars triangularis del giro frontale inferiore destro. Questa regione, in particolare nell'emisfero sinistro negli adulti e più bilateralmente nei bambini piccoli, è nota per essere importante nei processi alla base dell’acquisizione della lettura quali la decodifica, l’elaborazione fonologica e la ripetizione subvocale. La dissociazione nella

direzionalità dell'associazione nell'attivazione funzionale e nelle proprietà morfometriche nel giro frontale inferiore destro viene interpretata dagli autori in termini di efficienza neurale.

Recentemente, tuttavia, sono state proposte diverse spiegazioni aggiuntive sul vantaggio della scrittura manuale rispetto alla dattilografia.

Secondo James & Engelhardt (2012) la variabilità percettiva richiesta dalla scrittura a mano potrebbe essere la fonte del suo vantaggio. I comandi motori efferenti inviati dal cervello per produrre una determinata lettera portano a output variabili, cioè le produzioni scritte a mano che a loro volta costituiscono input ambientali variabili per il sistema visivo che rimodellano i confini della categoria delle lettere. A differenza della scrittura a mano, la dattilografia non fornisce tale variabilità poiché espone lo studente a un esemplare prototipo singolo e invariante di ciascun carattere sia a livello di output che di input.

Una terza interpretazione è quella proposta da Seyll & Content (2022) che attribuisce il vantaggio all'analisi visiva dettagliata richiesta dalla scrittura a mano portando prove a sfavore dell'ipotesi grafomotoria di Longcamp et al. (2006). Nel loro studio, la scrittura a mano è stata confrontata, oltre che con la digitazione, anche con un terzo compito chiamato "composizione" che consisteva nel riprodurre la lettera bersaglio selezionando le caratteristiche appropriate e assemblandole insieme come in un puzzle. La composizione è un metodo che richiede un'analisi visiva dettagliata ma, a differenza della scrittura, non richiede nessuna attività grafomotoria specifica.

La scrittura e la composizione hanno portato alla medesima accuratezza di riconoscimento delle lettere, superiore rispetto alla digitazione.

Sebbene questi risultati non forniscano alcuna prova a favore di un contributo dei programmi motori grafici e della scrittura a mano di per sé, gli autori suggeriscono che in classe, l'addestramento alla scrittura a mano e gli esercizi di copiatura possono costituire il modo più naturale per promuovere un'analisi visiva dettagliata.

Tuttavia, la scrittura a mano potrebbe non costituire un metodo di apprendimento adatto per i bambini con scarse capacità motorie, in questo caso il maggior beneficio potrebbe essere tratto dall'apprendimento della composizione (Seyll & Content, 2022).

1.3 I Disturbi Evolutivi della Scrittura

Bambini e adolescenti italiani spendono dal 30 al 60% della loro giornata scolastica eseguendo attività di scrittura.

Essa si rivela uno strumento molto importante per l'apprendimento poiché aiuta lo studente a sintetizzare in maniera efficace i propri pensieri e a prendere appunti, inoltre si associa a produzioni più ricche dal punto di vista espressivo e compositivo (“writer effect”) e a votazioni più alte da parte degli insegnanti (“writer effect”) (LG-ISS, 2022, p. 190).

Va ricordato tuttavia che, una percentuale significativa di bambini (6-33%) soffre di disturbi evolutivi della scrittura, ovvero di compromissione nell'acquisizione delle capacità di scrittura.

L'apprendimento della scrittura può essere compromesso in disturbi dello sviluppo neurologico come ADHD, autismo, DCD o disprassia, ma può anche presentarsi come una condizione di natura specifica non imputabile a nessun'altra condizione patologica né a inadeguata scolarizzazione.

Dal punto di vista nosografico l'ICD-10 (OMS, 1992) riconosce il *disturbo disortografico* come un disordine persistente delle capacità di codificare correttamente la forma ortografica delle parole (F81.1). Nello stesso manuale è previsto un *disturbo dell'espressione scritta* che è talvolta utilizzato dai clinici per indicare la disgrafia evolutiva.

Il DSM-5 parla di “*compromissione dell'espressione scritta*” (315.2) e descrive tre condizioni possibili che possono concorrere alla diagnosi e vanno di volta in volta specificate: deficit nelle competenze ortografiche, grammaticali o testuali.

Entrambi i sistemi di classificazione separano il disturbo della scrittura da quello della lettura ma riconducono entrambi sotto l'etichetta dei Disturbi Specifici dell'Apprendimento (DSA) (Pinton & Tucci, 2017).

Come riportato nelle recenti Linee guida (2022, p. 1) i DSA sono i più frequenti disordini del neurosviluppo (prevalenza 5-15%) che riguardano domini cognitivi specifici (lettura, scrittura, calcolo, comprensione), non interessano il funzionamento cognitivo più generale ma le loro conseguenze possono comunque essere pervasive e interessare molti ambiti del funzionamento cognitivo, dell'adattamento personale e sociale.

Gli studiosi, da anni, condividono la concettualizzazione dei DSA come disturbi caratterizzati da un'eziologia multifattoriale rispetto a cui la dimensione genetica e neurobiologica (anomalie dei circuiti neurofunzionali che impegnano le abilità di lettura, scrittura e calcolo) è parzialmente condivisa e ha sicuramente un peso significativo, ma all'interno di un'interazione tra più fattori di rischio e più fattori protettivi (Salvan & Carrara, 2022).

Il DSM-5, che è il manuale più utilizzato per l'assegnazione dei DSA individua una serie di criteri diagnostici che devono essere soddisfatti: sintomi che durano per almeno 6 mesi, interferenza significativa con il rendimento scolastico, esordio durante i primi anni scolastici e non giustificato da altri disturbi.

La legge n.170/2010 all' art. 1, date le frequenti dissociazioni all'interno del "Disturbo dell'apprendimento della lingua scritta", separa la "disgrafia" dalla "disortografia". Il primo disturbo riguarda la realizzazione grafica e si traduce in una scrittura di difficile comprensione mentre il secondo riguarda i processi linguistici di transcodifica e porta ad un numero elevato di errori ortografici.

Tale distinzione è dibattuta e non viene condivisa dai principali manuali diagnostici che non considerano la disgrafia come un disturbo isolato ma come un segno di altri Disturbi primari quali il "Disturbo evolutivo specifico della funzione motoria" o "altri disturbi evolutivi delle abilità scolastiche" (ICD-10) o il "Disturbo di sviluppo della Coordinazione" (DSM 5).

Alla base di queste incoerenze vi è il fatto che processi grafo-motori e ortografici sono in stretto rapporto, una difficoltà a carico di uno va a consumare risorse cognitive e mnestiche con conseguenze sull'altro e viceversa.

Entrambi i processi impattano poi sugli aspetti di pianificazione della frase e del testo.

1.3.1 Parametri e strumenti per la diagnosi

Per quanto riguarda i parametri diagnostici, nel caso della disortografia, l'attenzione del clinico è rivolta al numero e alla tipologia di errori ortografici, grammaticali e testuali commessi dal bambino (es. errori riguardanti le regole di biunivocità, il magazzino delle regole ortografiche, il lessico ortografico, la gestione di caratteristiche fonetiche).

In letteratura sono state validate tutta una serie di prove quali dettato di liste di parole, non parole e frasi con omofoni, autodettato di parole, dettato di brano, copia e composizione di testo (Cornoldi et al., 2007).

Nel caso della disgrafia, a causa dell'incoerenza tra sistemi diagnostici internazionali e legislazione italiana, le linee di indirizzo per la diagnosi (e l'intervento) sono state a lungo incerte. Nel tentativo di superare questa situazione che ha portato molto spesso a ignorare il disturbo, le nuove Linee Guida (ISS, 2022) hanno fornito nuove raccomandazioni in merito.

I criteri classicamente usati per la diagnosi sono la leggibilità del testo e la velocità (Cornoldi et al., 2007), il parametro velocità deve però essere considerato nel suo aspetto di fluenza in quanto la velocità intesa come tempo totale impiegato è un indice meno affidabile nel connotare le grafie dei poorwriters.

Gli strumenti usati in ordine di tempo, per la valutazione di questi due parametri, sono stati: le valutazioni globali-olistiche, le valutazioni analitiche di un testo scritto e l'uso di metodi computerizzati. I primi due analizzano il prodotto scritto, l'ultimo il processo che lo rende possibile (Rosenblum et al., 2003).

Le scale di tipo olistico prevedono che un valutatore classifichi il prodotto scritto rispetto ad una scala di campioni standard di grafia ordinati dal "meno" al "più leggibile". Poiché si rivelano poco pratiche e molto soggettive, sono state sviluppate le scale analitiche che prevedono l'assegnazione di un punteggio ai principali criteri qualitativi alla base della leggibilità della scrittura (dimensioni, inclinazione, spaziatura, forma, aspetto complessivo) e il calcolo di un punteggio globale. La BHK (a cura di Di Brina & Rossini, 2021) che rientra all'interno di questa categoria, rappresenta uno degli strumenti diagnostici più usati nell'ambito clinico italiano.

Negli ultimi venticinque anni sono state sviluppate numerose scale analitiche; tuttavia, esse presentano una serie di limiti metodologici come un'elevata variabilità rispetto ai fattori che possono influenzare i punteggi dei risultati, alla formazione richiesta ai valutatori, al formato di scrittura (es. scrivere su fogli con righe o senza) etc. che le rendono poco affidabili (Rosenblum et al., 2003).

In generale, questi strumenti valutano il prodotto finale statico senza indagare la fonte sottostante della difficoltà.

Lo sviluppo tecnologico e informatico degli ultimi vent'anni ha permesso ai ricercatori di esaminare la scrittura sotto una luce completamente nuova, consentendo invece la misurazione quantitativa del processo di scrittura mediante metodi computerizzati come penne e tavolette digitali in cui sono implementati software di analisi, appositamente studiati, in grado di registrare le coordinate “x” e “y” della penna mentre viene mossa sulla superficie elettronica (Rosenblum et al., 2003).

Tali registrazioni sono in grado di individuare le caratteristiche dinamiche della scrittura in quanto rilevano in tempo reale il moto della penna determinandone la posizione, la velocità e l'accelerazione in ogni istante temporale.

Le variabili cinematiche più usate sono: tempo totale “on paper” (traccia sul foglio), “in air” (movimenti della penna che non lasciano traccia), il numero di caratteri per minuto, la velocità (rapporto tempo sulla distanza percorsa), lunghezza del percorso dello strumento “su carta” e “in aria”, la differenza dei picchi di velocità segnale-rumore (SNv_{pd}), il numero delle variazioni della direzione della velocità (NCV), il numero di segmenti di inversione di direzione (riflettono le autocorrezioni).

Le penne sono invece dotate di sensori che consentono di registrare indici cinetici come la pressione.

Grazie all'utilizzo di questi strumenti è emerso come, a differenza degli scrittori efficienti, la scrittura di soggetti con difficoltà grafo-motorie mostra dei pattern di movimento più irregolari sia nella successione di tratti che nelle pause e nella modulazione della velocità, ed è caratterizzata da una mancanza di precisione e coerenza nel tempo e nello spazio, con una capacità ridotta di regolare la forza. In merito alla cinetica, è stata trovata una forza nella presa tridigitale significativamente più bassa tra i bambini con disgrafia rispetto ai coetanei con sviluppo tipico, essa però tende ad aumentare in un compito protratto, questo potrebbe riflettere un tentativo strategico di fronteggiare la fatica muscolare (LG- ISS, 2022, p.198).

Gli studenti con disgrafia mostrano una scrittura manuale, con lunghi e frequenti sollevamenti della penna, mancanza di continuità nel segno, presenza di tratti incerti e poco regolari, problemi di velocità, leggibilità e processi di interruzione del movimento, durante la formazione di una lettera. In altre parole, è presente un controllo motorio più immaturo che autori come Van Galen (1993) hanno spiegato in termini di “rumore neuromotorio”.

Gli studiosi concordano nel ritenere il grado di variabilità nella velocità della scrittura e nella durata delle pause il miglior indicatore di difficoltà di scrittura.

La durata delle pause indica il tempo necessario al bambino per un'ulteriore programmazione dei movimenti. In altre parole, questi bambini sembra elaborino gli aspetti globali del compito prima di iniziare, rimandando l'ulteriore programmazione durante l'esecuzione; questa strategia seriale di elaborazione sembra interrompere la fluidità del movimento (LG- ISS, 2022, p.199).

In sintesi, le analisi basate su strumenti computerizzati si rivelano più accurate, sensibili e affidabili rispetto a quelle soggettive, tuttavia, presentano una serie di limiti: sono più costose, hanno delle caratteristiche strutturali che ostacolano la scrittura, per esempio la superficie scivolosa del vetro del touchscreen di un tablet ha un attrito inferiore rispetto alla carta e quindi fornisce meno feedback sensoriale a chi scrive. Scrivere su un touchscreen potrebbe quindi aumentare la difficoltà di controllo motorio e portare a movimenti di scrittura disturbati rispetto alla scrittura su carta, come suggerito da numerosi studi recenti (Guilbert et al., 2019). Infine, le applicazioni pratiche sono ancora limitate, ad esempio, un computer non è capace di prendere una decisione globale sulla leggibilità del prodotto di scrittura (Rosenblum et al., 2003).

Le nuove Linee Guida (ISS, 2022) ne raccomandano comunque l'utilizzo, in integrazione ai test qualitativi per trarre vantaggio dai punti di forza di entrambe le procedure, e propongono come obiettivo di ricerca quello di raccogliere più dati relativi all'analisi del processo della scrittura per sviluppare software e standardizzazioni.

Pregrafismo

Gli studi sul processo di scrittura, condotti tramite i dispositivi digitali sopracitati, hanno utilizzato principalmente compiti nei quali era prevista la scrittura o la tracciatura di numeri, lettere, sillabe, parole e non parole.

A livello didattico, il passaggio dal disegno alla scrittura non è immediato ma prevede l'utilizzo di quelli che vengono definiti "esercizi di pregrafismo" o di prescrittura che hanno la funzione di esercitare i movimenti alla base della formazione delle diverse lettere.

In letteratura, pochi studi si sono incentrati sullo sviluppo pre-scritturale tramite l'utilizzo di tali compiti, in generale si rileva un aumento della velocità con l'età e una migliore

qualità del disegno delle linee, suggerendo che esista un'evoluzione statisticamente significativa, sia qualitativa che quantitativa nell'esecuzione di gesti grafomotori (Vaivre-Douret et al., 2021). È stata inoltre documentata una velocità di disegno più lenta nei bambini con difficoltà di apprendimento (Galli et al., 2011).

Poiché un compito di pregrafismo, come copiare una linea di anelli, può essere svolto già in prima elementare e in assenza di previa acquisizione della scrittura, condurre studi utilizzando tali compiti può consentire di isolare i prerequisiti motori e spazio-temporali della grafia. Inoltre, consente di osservare un'evoluzione delle misure spazio-temporali e gestuali cinematiche e l'evoluzione dell'organizzazione dello sviluppo del gesto grafomotorio (Vaivre-Douret et al., 2021).

Uno studio recente condotto con un compito di pregrafismo che prevedeva la riproduzione di linee cicloidi (Vaivre-Douret et al., 2021), ha mostrato una buona validità simultanea e di contenuto, utilizzando il test standardizzato BHK. Quanto più immaturo era il gesto grafomotorio nel riprodurre una linea di loop, tanto più grande era la scrittura nel test BHK e tanto più spesso le lettere venivano significativamente corrette.

In conclusione, compiti di pregrafismo, come riprodurre linee cicloidi, potrebbero aiutare a identificare i livelli di prestazione dello sviluppo della scrittura ed essere buoni predittori della leggibilità e della velocità di scrittura successiva.

Conclusioni

Il presente capitolo ha cercato di dimostrare come le abilità motorie di base, al pari delle abilità percettive, attentive e mnestiche su cui classicamente si è concentrata l'attenzione dei ricercatori, abbiano un ruolo cruciale nelle traiettorie di sviluppo tipico e atipico del linguaggio.

Nel successivo capitolo verrà approfondita l'abilità ritmica, un processo di base meno indagato dalla letteratura che ha anch'esso un ruolo cruciale nello sviluppo linguistico ed è in stretta relazione con il sistema motorio (Russo & Valenza, 2021).

2 Capitolo – Il ruolo del ritmo nel “language by hand”

Il ritmo è una caratteristica fondamentale della vita ed è alla base di due abilità tipicamente umane: la musica e il linguaggio. Nel presente capitolo saranno riportate evidenze a sostegno della stretta relazione tra ritmo e linguaggio, con il preciso intento di mettere in luce come questo legame caratterizzi tutta la traiettoria evolutiva influenzando l’acquisizione delle abilità di alfabetizzazione in età scolare.

Poiché nella relazione ritmo-linguaggio entra in azione in maniera rilevante anche il sistema motorio, particolare attenzione sarà rivolta al ruolo del ritmo nel processo di scrittura, ancora poco esplorato dalla letteratura.

2.1 Il processamento neurale del ritmo

Il ritmo, nel suo significato più generale, indica uno schema di eventi che si ripetono regolarmente nel tempo e possono essere condivisi tra entità (McAuley, 2010). Come sottolineato da questa definizione, la sua caratteristica principale è la periodicità, ossia la ripetizione di “cicli” con una velocità o frequenza particolare. L’inizio di ogni ciclo è chiamato fase, la sincronizzazione delle fasi genera un fenomeno fisico chiamato trascinarsi.

Se gli intervalli tra gli eventi sono uguali il ritmo è definito isocrono (Ravignani & Madison, 2017), tale ritmo caratterizza la vita degli esseri viventi e il mondo in cui essi vivono in quanto è rintracciabile nel battito cardiaco, nella respirazione, nella locomozione, nelle oscillazioni neurali etc., tuttavia, l’isocronia non è un requisito fondamentale né per percepire né per adattarsi al ritmo. L’uomo è infatti in grado di elaborare e sincronizzarsi anche a ritmi non periodici come quelli del linguaggio.

I linguaggi umani, similmente alla musica, sono flussi sonori complessi che presentano una ricca organizzazione ritmica che dipende dall’alternanza di elementi forti e deboli a più livelli della gerarchia prosodica (Ladany et al., 2020). Al livello più basso detto segmentale, il ritmo è dato dall’alternanza tra consonanti e vocali, al di sopra del livello segmentale il ritmo è dato dall’alternanza tra sillabe accentate e non, mentre a livello fonologico da parole con e senza accento (Langus et al., 2017).

La principale distinzione tra musica e linguaggio è legata all’isocronia, propria solo della musica; in realtà sia la musica che il linguaggio possono essere definiti come segnali quasi

periodici che variano all'interno di un continuum che va dall'isocronia alla non periodicità (Kotz et al., 2018).

Oltre a percepire ed elaborare il ritmo linguistico e musicale, gli esseri umani si sincronizzano e si muovono a ritmo e si impegnano in attività ritmiche sociali come la danza e il canto corale.

L'abilità ritmica umana è quindi multidimensionale e comprende diversi processi quali percezione, produzione e sincronizzazione che, seppur strettamente connessi, non sempre coesistono. Per esempio, un individuo può ascoltare un ritmo senza compiere alcun movimento oppure muoversi in sincronia, in entrambi i casi l'attivazione cerebrale presenta diverse sovrapposizioni (Frey et al., 2022).

Il circuito neurale che supporta la percezione e la produzione di ritmi è stato ben descritto (*Figura 5*) e coinvolge una sofisticata rete cortico-sottocorticale che comprende diverse connessioni: networks bidirezionali tra regioni di pianificazione motoria e regioni uditive. Nello specifico si tratta di due rami del fascicolo longitudinale superiore, il primo collega le regioni uditive secondarie nel giro temporale superiore e medio alle regioni parietali vicino al giro angolare (in arancione nella *figura 5*), mentre il secondo collega le regioni vicino al giro angolare alla corteccia premotoria dorsale (in azzurro) (Patel, 2021). Oltre a queste due connessioni, sono rilevanti anche il circuito motorio cortico-striato-talamo-corticale (mCBGT, in blu) (Merchant & Honing, 2014) e il circuito attenzionale che coinvolge la corteccia prefrontale (in rosso) (Kotz et al., 2018).

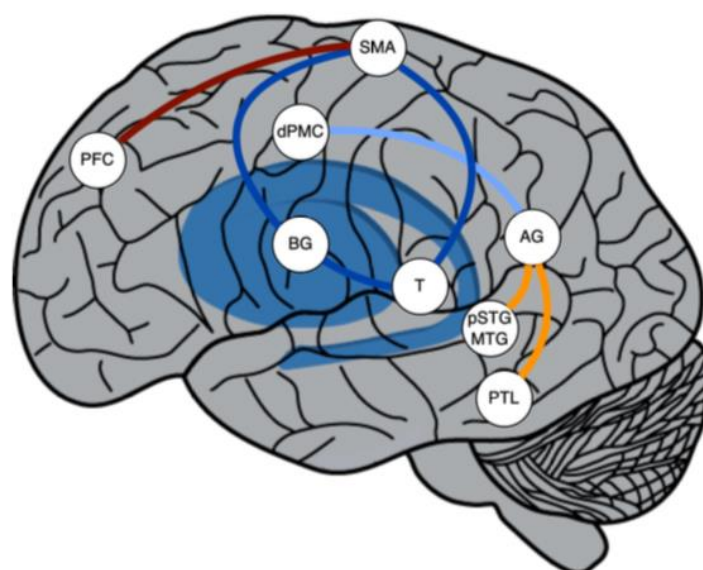


Figura 5 Networks di interesse per le abilità ritmiche (tratto da Russo, 2022)

In sintesi, i circuiti neurali alla base della percezione e produzione del ritmo coinvolgono aree corticali e sottocorticali tradizionalmente associate al sistema motorio e a quello linguistico, suggerendo l'esistenza di un profondo legame tra ritmo e linguaggio mediato dai processi motori.

I circuiti così delineati supportano una serie di meccanismi neurali alla base delle abilità ritmiche che sono stati ben sintetizzati nel quadro teorico proposto recentemente da Fiveash et al., (2021) chiamato PRISM.

Gli autori, unificando le evidenze provenienti da differenti teorie e campi di ricerca, hanno tentato di fornire un quadro completo sui processi alla base dell'elaborazione del ritmo, in particolar modo nella musica e nel parlato, individuando tre meccanismi strettamente interconnessi: il processamento uditivo fine, la sincronizzazione/trascinamento delle oscillazioni neurali agli stimoli ritmici esterni e l'appaiamento sensori-motorio.

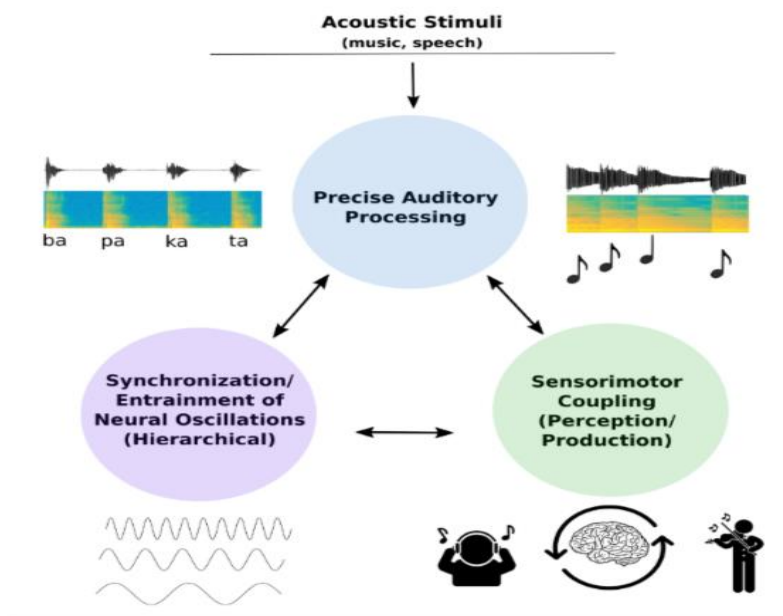


Figura 6 I tre meccanismi alla base dell'elaborazione del ritmo nella musica e nel parlato osservati in diverse teorie (tratto da Fiveash et al., 2021)

Per *preciso processamento uditivo fine* si intende la capacità di discriminare sottili variazioni di tempo, intonazione e timbro nel parlato (ad esempio, /ba/ da /pa/) e nella musica (Patel, 2011). Il sistema uditivo, oltre al filtraggio spettrale, codifica esplicitamente l'informazione ritmica in modo computazionale. La ricerca sugli esseri

umani e su altri mammiferi ha infatti fornito prove dell'esistenza di codici neurali per la rappresentazione di informazioni acustiche periodiche. Per esempio, nella corteccia uditiva umana sono state scoperte, con la tecnica MRI, mappe di "periodicità" (Hickok et al., 2015).

Il *trascinamento neurale* è il processo mediante il quale l'attività oscillatoria endogena nel cervello si sincronizza in fase con i ritmi uditivi della musica e del parlato. Questo fenomeno sostiene l'allocazione temporale dell'attenzione verso porzioni ricorrenti (prevedibili) del segnale con effetti positivi sull'elaborazione uditiva, sull'apprendimento e la memoria.

È stato dimostrato che le bande di frequenza delta (1-3 Hz), theta (4-8 Hz) e gamma bassa (25-35 Hz) caratterizzano rispettivamente la risposta neurale al discorso a livello frasale, sillabico e fonemico (Giraud e Poeppel, 2012).

Infine, l'appaiamento sensori-motorio si riferisce alle connessioni tra corteccia sensoriale uditiva e corteccia motoria che sostengono la percezione e produzione del ritmo. Secondo alcune teorie, le regioni motorie (corteccia premotoria, SMA, pre-SMA e putamen) ricevono gli input sensoriali dalla corteccia uditiva, creano una pianificazione motoria e una previsione temporale e la rinviando alla corteccia uditiva. (Patel, 2021).

A conferma della stretta connessione tra questi tre meccanismi, è stato dimostrato che sia l'elaborazione uditiva che l'accoppiamento sensorimotorio sono supportati dall'entrainment ritmico neurale (Morillon e Baillet, 2017; Fiveash et al., 2021),

I ritmi neurali endogeni (che si trovano in tutto il cervello) codificano la velocità di modulazione degli stimoli acustici al pari del sistema uditivo; tuttavia, la loro elaborazione sembrerebbe essere top-down a differenza di quella uditiva che è bottom-up, essi infatti favoriscono finestre temporali attenzionali che influenzano la predizione e la successiva rilevazione degli eventi salienti nel segnale linguistico migliorando l'elaborazione uditiva del segnale stesso (Hickok et al., 2015).

Per quanto riguarda l'appaiamento sensorimotorio, il ruolo delle oscillazioni neurali nella corteccia motoria e uditiva è quello di sovrapporsi per facilitare l'appaiamento e garantire, anche in questo caso, una migliore percezione.

Poiché il meccanismo dell'entrainment è fondamentale nell'elaborazione del parlato, e può essere facilmente generato da segnali estremamente ritmici e prevedibili come quelli musicali, la musica diviene uno stimolo ideale per promuovere l'elaborazione linguistica

(Hickok et al., 2015). Questo assunto è alla base dell'implementazione e dell'utilizzo di training ritmico-musicali nei disturbi del linguaggio che verranno approfonditi nel pragrafo 2.4 (Thomson, 1990; Overy, 2003; Bègel et al, 2017; Cancer et al, 2019; Frey et al., 2022).

2.2 La relazione tra ritmo e linguaggio

La presenza di una ricca organizzazione ritmica nel linguaggio e le evidenze relative al coinvolgimento delle aree linguistiche nel circuito neurale alla base della percezione e produzione del ritmo (Patel, 2021), hanno portato gli studiosi ad ipotizzare che la struttura ritmica del discorso possa servire da impalcatura per lo sviluppo del linguaggio, avviando le prime fasi dell'acquisizione e il successivo sviluppo di abilità linguistiche complesse.

2.2.1 Ritmo e linguaggio parlato

Nel presente paragrafo si cercherà di chiarire lo stretto legame tra ritmo e linguaggio parlato adottando la prospettiva filogenetica e ontogenetica.

Filogenesi

Poiché ciò che siamo è plasmato dalla nostra storia, è di grande interesse esplorare le radici evolutive del ritmo e del linguaggio per comprendere appieno il loro legame.

Il ritmo è una caratteristica essenziale della vita, tutti gli animali si impegnano in attività ritmiche come la respirazione, la locomozione, l'attività neurale etc e sono in grado di discriminare il battito; tuttavia, gli esseri umani sono l'unica specie che mostra una tendenza spontanea a impegnarsi in attività gruppali ritmiche e sincronizzate come il canto e la danza (Patel, 2021).

Tale capacità spontanea di sincronizzarsi rispetto ad uno stimolo ritmico percepito (BPS) è definita trascinalamento e rappresenta un comportamento eccezionale dal punto di vista biologico, non rintracciabile nei nostri parenti viventi più prossimi (scimmie), né in molte specie animali (Merker et al., 2009).

Studi filogenetici hanno cercato di capire se questa abilità sia il risultato di una specializzazione neurale oppure si basi su circuiti neurali che si sono evoluti per altri motivi, il dibattito è tutt'ora aperto.

Secondo Patel (2021) l'origine è rintracciabile nei circuiti neurali per l'apprendimento vocale complesso che avrebbero consentito alle abilità ritmiche complesse (BPS) e a quelle linguistiche di evolversi di pari passo.

Per apprendimento vocale, Patel (2006) indica la necessità, propria di un gruppo ristretto di mammiferi (cetacei, pinnipedi, esseri umani, uccelli canori, pappagalli e colibri), di ricevere input uditivi per sviluppare le produzioni vocali specie-specifiche.

La capacità di modificare il repertorio vocale in base alle esperienze uditive sociali si basa su un'integrazione audio-motoria a livello del prosencefalo (*Figura 6*) e sembra variare lungo un continuum all'interno delle specie, nella parte alta del continuum ritroviamo i pappagalli e gli esseri umani, definiti "high vocal learners", che sono le uniche specie, ad oggi note per impegnarsi spontaneamente nella BPS.

Secondo questa teoria (rVHL), l'evoluzione dell'apprendimento vocale ha interagito con i comportamenti vocali ritmici ancestrali dei primati per produrre BPS sporadici in risposta a ritmi uditivi periodici, successivamente la coevoluzione gene-cultura ha affinato tali capacità, portando negli esseri umani, a specializzazioni neurali evolute per una BPS sostenuta.

In sintesi, le radici evolutive delle abilità ritmiche possono essere ricondotte alla capacità di produrre movimenti periodici (quasi universale tra gli animali), di percepire il battito (condivisa con i primati non umani), alla capacità di trascinamento motorio con i conspecifici (condivisa con animali che attuano comportamenti sincroni come insetti, rane e granchi) e alla capacità di trascinamento a ritmi esterni (BPS; che sembra essere condiviso solo tra le specie definite "high vocal learners").

Secondo Ravignani e Madison (2017) lo sviluppo delle abilità ritmiche avrebbe dato forma alle prime proto-interazioni di gruppo promuovendo una ramificazione nella linea evolutiva: una ha portato all'isocronia rintracciabile nella musica e nella danza, mentre l'altra ha portato alla non isocronia del linguaggio e del discorso.

Ulteriori ricerche filogenetiche potranno fornire informazioni aggiuntive sulle radici evolutive del ritmo e del linguaggio, sul loro legame e sugli adattamenti funzionali che hanno portato alla specializzazione neurale e cognitiva, attraverso le continue interazioni con l'ambiente esterno.

Ontogenesi

Feti e neonati sono in grado di percepire e produrre ritmi (Provasi et al., 2014). Le prime esperienze avvengono nel grembo materno dove il feto riceve numerose stimolazioni ritmiche multisensoriali provenienti dai movimenti della madre, dai suoi organi interni e dalla sua voce che pongono le basi per lo sviluppo delle abilità ritmiche e linguistiche.

Inizialmente tali esperienze sono mediate dal sistema vestibolare-tattile-somatosensoriale (VTS) la cui maturazione anticipa quella del sistema uditivo e visivo nello sviluppo prenatale (Provasi et al., 2014).

A partire dal terzo trimestre di gestazione, i feti possono percepire segnali ritmici provenienti dall'ambiente intrauterino ed extrauterino attraverso la conduzione ossea che veicola, in particolare, le basse frequenze consentendo l'intelligibilità dei modelli ritmici sia del parlato che della musica (Granier-Deferre et al., 2011).

A conferma della sensibilità alle stimolazioni ritmiche VTS, una serie di studi mostrano che i feti, prossimi alla nascita, variano la frequenza cardiaca in funzione del movimento materno ritmico passivo (mamma posizionata su una sedia a dondolo) (Lecanuet & Jackuet, 2002), inoltre, la cadenza del movimento e la deambulazione dei genitori, esperiti sia prima che subito dopo la nascita, correlano con il ritmo motorio spontaneo dei bambini piccoli, confermando l'influenza di tali esperienze sui comportamenti ritmici nell'infanzia (Rocha et al., 2021).

Anche la stimolazione ritmica VTS postnatale ha un effetto modulatorio su alcuni parametri come la frequenza respiratoria (Zimmerman & Barlow, 2012) ed è in grado di influenzare la percezione uditiva (Philips-Silver & Trainor, 2005).

Questi studi trovano riscontro e a loro volta contribuiscono a validare la pratica del dondolio, utilizzata da operatori sanitari e genitori di tutte le culture per calmare i neonati. Tale pratica viene spesso associata al ritmo di una ninna nanna cantata, a conferma della forte connessione multisensoriale tra il movimento del corpo e l'elaborazione del ritmo uditivo.

Con lo sviluppo del sistema uditivo, verso la trentesima settimana gestazionale, il feto inizia a percepire i ritmi uditivi che derivano dall'attività respiratoria e dai ritmi cardiovascolari materni e fetali. Lo stimolo più saliente è il battito cardiaco della madre che consiste in pulsazioni con pattern variabili a frequenze comprese tra 200 e 800 Hz (Provasi et al., 2014).

Tra la 32-34esima settimana gestazionale, i feti iniziano a rispondere alla voce della madre apprendendone le caratteristiche prosodiche specifiche e altri segnali come il ritmo sillabico, il tempo di inizio della voce delle consonanti, la struttura armonica dei suoni vocalici sostenuti e l'ordine temporale di questi suoni. Si tratta di informazioni essenziali per l'acquisizione del linguaggio, in quanto consentono ai neonati di ordinare le frasi in classi basate su proprietà ritmiche e temporali e, così facendo, di riuscire a discriminare la voce della madre da quella di una sconosciuta, la propria lingua madre da quella straniera o due lingue straniere diverse, già alla nascita (Provasi et al., 2014).

In poche parole, l'esperienza ritmica linguistica prenatale modella la risposta del cervello al linguaggio.

La maggior parte degli stimoli ritmici prenatali, generati dalla madre, vengono vissuti dal feto in modalità sia uditiva che vestibolare tattile e somatosensoriale (es. il cammino della madre viene esperito dal feto sia a livello VTS che uditivo in quanto il contatto dei piedi con la superficie genera rumore). Questa stimolazione ritmica vibro-acustica si associa a risposte aumentate sia nel feto che nel neonato (Philips-Silver & Trainor, 2005).

Oltre a percepire i ritmi, feti e neonati sono anche in grado di produrre modelli ritmici diversi attraverso le pulsazioni cardiache, i movimenti respiratori, il singhiozzo, la suzione, la respirazione nasale per l'olfatto e la deglutizione per la degustazione, il pianto e i movimenti di braccia e gambe (Provasi et al., 2014).

Per quanto riguarda l'abilità di sincronizzazione sensorimotoria (SMS) dei neonati, gli studi condotti non sono numerosi ma sembrano dimostrare la presenza di una forma primitiva di SMS alla nascita, tuttavia, gli intervalli entro i quali essa è possibile sono molto più ristretti rispetto a quelli degli adulti e devono avvicinarsi al ritmo naturale dei movimenti del bambino (Provasi et al., 2014).

Più numerosi sono gli studi che, concentrandosi sulle interazioni precoci, hanno indagato la capacità del bambino di interagire in un dialogo ritmico con il caregiver (Trevvarthen, 1979). Viene messo in evidenza come gli adulti di tutte le culture variano spontaneamente le caratteristiche ritmiche (tempi e contorni di tono diversi) del linguaggio per parlare ai neonati e utilizzano ninne nanne o canzoni con caratteristiche ritmiche distintive che hanno la funzione di aumentare l'attenzione e la reattività dei bambini, i quali rispondono con vocalizzazioni alternate.

In sintesi, già alla nascita, le componenti ritmiche del linguaggio, del canto e della musica svolgono un ruolo importante nel potenziare l'eccitazione dei bambini e la loro espressione comunicativa vocale e corporea (Provasi et al., 2014).

Successivamente nell'infanzia, il ritmo linguistico sostiene l'acquisizione lessicale, sintattica e grammaticale poiché guida l'attenzione dei bambini verso le porzioni salienti del discorso e funge da indizio per identificare i confini delle parole e segmentarle dal discorso continuo (Langus et al., 2017).

In conclusione, gli studi ontogenetici confermano lo stretto legame tra abilità ritmiche e linguistiche, in particolare, il ritmo linguistico sembra avviare le prime fasi di acquisizione del linguaggio parlato.

2.2.2 Ritmo e letto-scrittura

A conferma della concettualizzazione del linguaggio come un processo avente una lunga traiettoria evolutiva che cresce in complessità partendo dalle abilità uditive di base, fondamentali per l'elaborazione prosodica e fonologica nell'infanzia, fino a capacità cognitive più elevate che supportano l'acquisizione di abilità di alfabetizzazione in età scolare, studi recenti mettono in luce come il legame tra ritmo e linguaggio prosegua all'interno della traiettoria evolutiva, legandosi all'acquisizione delle abilità di letto-scrittura.

La presenza di collegamenti tra abilità ritmiche e alfabetizzazione è stata documentata da numerosi studi che hanno correlato le prestazioni di popolazioni tipiche in diversi test ritmici con tutta una serie di misure dell'abilità linguistica quali: consapevolezza fonologica, accuratezza e fluidità di lettura, vocabolario espressivo e ricettivo, comprensione e produzione grammaticale, denominazione o ripetizione di non parole, percezione e codifica neurale del discorso, elaborazione e produzione morfosintattica e articolazione linguistica (Flaunacco et al., 2014; Bonacina et al., 2018; Steinbrink et al., 2019; Frey et al., 2022; Sun et al., 2022). Nello studio di Bonacina et al. (2018) è stata mostrata una relazione tra la capacità di sincronizzazione ritmica e le misure neurali di elaborazione del linguaggio, gli autori hanno rilevato, nei bambini che presentano una minor variabilità nella sincronizzazione ad un ritmo esterno, una maggiore coerenza di fase, una maggiore stabilità e una codifica dell'inviluppo più accurata. Questi processi

neurofisiologici supportano la velocità di elaborazione e l'elaborazione fonologica e di conseguenza la lettura.

Tuttavia, il ruolo dell'elaborazione basata sul ritmo nella relazione lettura-ritmo non è ancora ben chiaro, secondo Ozernov-Palchik e Patel (2018) esiste una relazione distinta, per cui l'elaborazione basata sul ritmo attingerebbe alla capacità dell'ascoltatore di utilizzare ricche regolarità contestuali per formare previsioni, la capacità previsionale è molto importante per lo sviluppo della lettura in quanto migliora la percezione di stimoli rumorosi e in rapida successione come le lettere in un testo.

Il legame tra elaborazione ritmica e alfabetizzazione sembra essere mediato dalla consapevolezza fonologica, un'ipotesi ritiene che all'inizio dello sviluppo del linguaggio i segnali ritmici nel linguaggio facilitino l'acquisizione delle rappresentazioni fonologiche necessarie per il successivo sviluppo delle abilità di mappatura grafema-fonema. Questa ipotesi prevede che gli effetti di mediazione fonologica diminuiscano man mano che la lettura diventa più automatica (Ozernov-Palchik & Patel, 2018).

Ritmo e lettura

Lo studio di Lange et al., (2018) suggerisce che la relazione ritmo-lettura sia legata anche ai movimenti oculari, i quali sono intrinsecamente ritmici (3-4 saccadi al secondo). Il processo di lettura si basa ampiamente sui movimenti oculari, i quali hanno due obiettivi funzionali: dirigere la fovea su informazioni specifiche dell'ambiente al fine di costruire un'immagine stabile e mantenere lo sguardo su oggetti in movimento (Strukelj et al., 2018). Il suono ritmico sembra essere in grado di manipolare questi movimenti, in particolare, l'aumento del ritmo musicale accelera le fissazioni nella lettura del testo, mentre la presenza (rispetto all'assenza) dello stimolo uditivo generalmente riduce il tempo di lettura complessivo (Lange et al., 2018).

A sostegno di quanto riportato, negli individui con dislessia sono state documentate difficoltà di previsione (Persici et al., 2019) e un'elaborazione alterata delle informazioni sul tempo di salita (tempo che impiega il volume per passare da zero al suo valore massimo) che ostacolano la segmentazione del flusso linguistico. Tali deficit sembrano essere causati da un'atipica oscillazione neurale al flusso linguistico che riguarda in particolare le bande lente Delta e Theta (Goswami, 2011).

È stata inoltre documentata, nei soggetti con DE, una ridotta accuratezza delle saccadi e dei vari tipi di movimenti oculari che può essere spiegata dal deficit nel sistema visivo magnocellulare (Stein, 2019).

Ritmo e scrittura

Sebbene gran parte della ricerca si sia concentrata sui collegamenti tra abilità ritmiche e linguistiche, molta meno attenzione è stata dedicata allo studio delle potenziali relazioni tra queste abilità ritmiche e le abilità di scrittura. Eppure, analogamente al linguaggio e ad altre azioni umane complesse, la scrittura non è solo una successione di atti isolati, ma piuttosto un processo organizzato, in cui il tempo e lo spazio di ciascuna unità motoria (cioè i tratti, le lettere e le parole) sono contestualmente interdipendenti l'uno dall'altro all'interno di un'unità più ampia (Frey et al., 2022).

Nello specifico, la scrittura rispetta due principi basati sull'organizzazione ritmica: i fenomeni di omotetia e isocronia (Lashley, 1951).

L'omotetia afferma che il rapporto tra le durate dei singoli eventi motori che compongono un atto motorio rimane invariante e indipendente dalla durata totale del movimento. Applicata alla scrittura a mano prevede che le durate relative delle singole lettere che compongono una parola siano mantenute costanti nonostante i cambiamenti nella durata globale. Tale invarianza nella struttura ritmica del movimento è stata osservata anche nella digitazione, nell'andatura e nei movimenti del polso.

L'isocronia si riferisce al rapporto proporzionale tra la velocità di esecuzione del movimento e la lunghezza della sua traiettoria. Per quanto riguarda la scrittura, prevede che qualunque sia la dimensione della grafia, la durata dell'esecuzione di un movimento venga mantenuta costante aumentando proporzionalmente la velocità di scrittura (Lashley, 1951).

Lo studio di Pagliarini et al., (2017) dimostra che i bambini rispettano entrambi i principi, sia nella scrittura in stampato che in quella corsiva, sin dalla prima classe della scuola primaria. La precoce adesione a questi principi suggerisce che una rappresentazione interna del ritmo della scrittura sia disponibile prima dell'età in cui la scrittura viene eseguita automaticamente.

Come già sostenuto per la lettura, lo studio di Ben-Pazi et al., (2007) ha dimostrato che la prestazione ritmica in un compito di tapping correla con la qualità della scrittura dei bambini, valutata da insegnanti esperti.

Infine, Pagliarini et al. (2017), hanno dimostrato che gli individui con dislessia e disgrafia non riescono a rispettare i vincoli ritmici della scrittura a mano, presentando una scrittura più lenta rispetto ai gruppi di controllo.

Tutti questi risultati portano prove a sostegno di un profondo deficit temporale nei bambini con dislessia che altera la percezione uditiva, visiva e la pianificazione motoria, ostacolando l'acquisizione della letto-scrittura.

Secondo Stein (2023) il deficit temporale può essere spiegato da una compromissione dei neuroni magnocellulari ("M") i quali si trovano in tutto il SNC e sono necessari per un'elaborazione temporale rapida e accurata degli stimoli visivi e uditivi (lettere e suoni delle lettere nelle parole), ma anche per altri tipi di stimoli in quanto si ritrovano nei sistemi somato-sensoriale, propriocettivo e motorio.

La tempistica accurata dell'elaborazione degli stimoli visivi e uditivi facilita la formazione di precise rappresentazioni mnestiche dell'ordine dei suoni e delle lettere in una parola e dipende dalla capacità di dispiegare l'attenzione in modo accurato e nella sequenza corretta.

Le cellule magnocellulari, date le loro caratteristiche, sono ritenute essenziali per l'attenzione visiva e uditiva sequenziale. Da queste evidenze si è sviluppata l'ipotesi del deficit specifico dell'attenzione spaziale potenzialmente conseguente ad un deficit M (Stein, 2019).

2.3 La relazione tra ritmo, sistema motorio e linguaggio

In linea con la teoria della Cognizione Incarnata (*Embodiment Cognition*) la dimensione fisico-corporea ha un ruolo cruciale nel processo di percezione ed elaborazione delle strutture ritmiche (Russo & Valenza, 2021).

Il legame tra ritmo e corpo ha origini nel grembo materno, gli studi ontogenetici riportati nel paragrafo 2.2 mostrano infatti che le esperienze ritmiche prenatali sono inizialmente mediate dal sistema VTS. Le esperienze ritmiche VTS caratterizzano anche il periodo postnatale (dondolio dei bambini, carezze etc.) e sono in grado di modellare il ritmo motorio spontaneo dei bambini piccoli (Rocha et al., 2021) e la preferenza di ascolto dei ritmi uditivi (Phillips-Silver e Trainor, 2005).

In età adulta, il movimento del corpo sia attivo che passivo che genera esperienza vestibolare, tattile e somatosensoriale, è in grado di attivare la corteccia uditiva

influenzando la codifica uditiva di ritmi ambigui (Phillips-Silver e Trainor, 2008), sottolineando un effetto della stimolazione VTS nell'elaborazione del ritmo nell'arco di vita.

Lo stretto legame tra ritmo e corpo si evince anche dal fatto che le attività motorie complesse come la locomozione e la scrittura presentano una componente ritmico-temporale che se compromessa si associa a movimenti disfunzionali (Ben-Pazi et al., 2015).

La presenza di interazioni uditivo-motorie bidirezionali alla base dell'elaborazione del ritmo del linguaggio (Fiveash et al., 2021, PRISM) e l'attivazione delle aree motorie all'ascolto della musica e del parlato in assenza di azione (Keitel et al., 2018), sottolineano la presenza di una forte relazione tra ritmo, sistema motorio e linguaggio.

Studi che si sono concentrati sulle scale temporali neurali e linguistiche hanno mostrato che il sistema motorio attua un tracciamento del parlato specificatamente nella scala temporale frasale, in particolare è stato suggerito che un accoppiamento a frequenza incrociata delta (0,6–1,3 Hz) beta (13–30 Hz), nelle aree motorie sinistre, rifletta la previsione temporale top-down, rilevante sia per la percezione di suoni semplici che per il parlato (Keitel et al., 2018). Si suggerisce quindi che l'elaborazione uditiva utilizzi il sistema di pianificazione motoria come fonte di input predittivi basati su un modello interno astratto del tempo per ottimizzare la comprensione del parlato (Iversen e Balasubramaniam, 2016).

Negli ultimi anni si è assistito a progressi significativi riguardo al ruolo dell'interazione uditivo-motoria nell'elaborazione generale del ritmo. Molti studi hanno indagato questo processo sfruttando un fenomeno comportamentale noto come sincronizzazione uditivo-motoria che oltre a riflettere la percezione di base del livello del battito e il tempismo dell'azione guida anche forme più complesse di percezione del ritmo, comprese quelle che coinvolgono ritmi gerarchici (Luo & Lu, 2023).

Il fenomeno della sincronizzazione uditivo-motoria può essere indagato tramite vari effettori, spesso si utilizza il paradigma del “finger tapping” che consiste nell'eseguire un movimento di tocco in corrispondenza di un suono. L'accuratezza della sincronizzazione viene generalmente valutata con misure come la media e la varianza del tempo del tocco e l'asincronia tra tocco e stimolo, oppure utilizzando misure circolari come la forza del blocco di fase (Iversen e Balasubramaniam, 2016).

Solitamente gli stimoli uditivi usati in questo paradigma sono isocroni e non vocali per cui presentano caratteristiche diverse rispetto a quelle del parlato. Studi recenti stanno iniziando ad usare ritmi con strutture gerarchiche e ritmi del parlato per capire se un comportamento non verbale come il tocco delle dita sia efficace nel rilevare la sincronizzazione uditivo-motoria specifica del parlato. Sebbene i risultati sembrano portare conferme (Ratchcke et al., 2021), la manipolazione della struttura ritmica nel parlato è complicata e quindi richiede progetti elaborati per essere indagata.

Inoltre, il tocco delle dita e la produzione del parlato coinvolgono scale temporali ottimali diverse: mentre l'interazione uditivo-motoria nell'elaborazione del parlato è limitata a circa 4,5 Hz, il tocco delle dita potrebbe adattarsi a una gamma più ampia di tempi, con un ritmo ottimale di frequenza intorno a 1,5 Hz. Pertanto, le conclusioni dovrebbero essere tratte con cautela, considerando le possibili discrepanze tra le dita e gli effettori del linguaggio (Luo & Lu, 2023).

Per ovviare a tali limiti Luo & Lu (2023) suggeriscono l'utilizzo del compito di sincronizzazione spontanea del parlato, noto anche come sincronizzazione parlato-parlato (SSS), recentemente sviluppato da Assaneo et al., (2019) che valuta la capacità dei partecipanti di sincronizzare la produzione del parlato con i suoni del parlato esterni (sincronizzare le proprie vocalizzazioni con sequenze di sillabe udite).

Altri studi sulla sincronizzazione uditivo-motoria come quello di Styns et al. (2007) mostrano una stretta sovrapposizione tra velocità locomotoria e velocità di battito musicale.

In conclusione, questi studi evidenziano un ruolo cruciale della dimensione fisico-corporea nel processo di percezione ed elaborazione delle strutture ritmiche musicali e linguistiche, in linea con la teoria della Cognizione Incarnata (Russo & Valenza, 2021).

2.3.1 Abilità ritmiche nelle traiettorie evolutive atipiche

Ulteriori prove a sostegno dello stretto legame tra ritmo, linguaggio e sistema motorio provengono dalla letteratura sullo sviluppo atipico che mette in luce la presenza di abilità ritmiche atipiche (discriminazione, sincronizzazione e coordinazione) in diversi disturbi dello sviluppo neurologico che causano difficoltà linguistiche e di movimento (Goswami, 2011; Chang et al., 2016; Ladany et al., 2020).

Il più ampio corpus di studi riguarda la dislessia (Goswami, 2011, TSF) ma risultati simili sono stati ottenuti anche in bambini con balbuzie (Hickok et al, 2011) e disturbo primario di linguaggio. È interessante notare che i deficit ritmici sono comuni anche nei bambini con disturbi del linguaggio in comorbidità con altri disturbi dello sviluppo neurologico che riguardano l'attenzione (ADHD) o le funzioni motorie (DCD) ma anche disturbi dello spettro autistico (Association et al., 2020, ASD) e, infine, con la sindrome di Williams (Martens et al., 2008, WS).

Poiché si tratta di disordini che molto spesso coesistono (alta comorbidità), diventa necessario adottare un approccio transdiagnostico che si concentri sullo studio dei meccanismi generali sottostanti. In questa prospettiva il ritmo atipico potrebbe essere un indicatore precoce cruciale, proprio come sostenuto da Ladanyi et al., (2020) che unificando questi risultati, hanno formulato l'ipotesi del Rischio del Ritmo Atipico (ARRH- Atypical Rhythm Risk Hypothesis) che considera le abilità ritmiche atipiche un fattore di rischio per la traiettoria evolutiva del linguaggio.

Tale ipotesi, sulla base di studi genetici, neurali e comportamentali che mostrano una moderata ereditabilità delle abilità ritmiche (Andreola et al., 2021), ha postulato che esse possano variare lungo una distribuzione continua e normale nella popolazione. Scarse abilità ritmiche coincidono con la coda della distribuzione dello sviluppo atipico rappresentando un fattore di rischio (*Figura 7*).

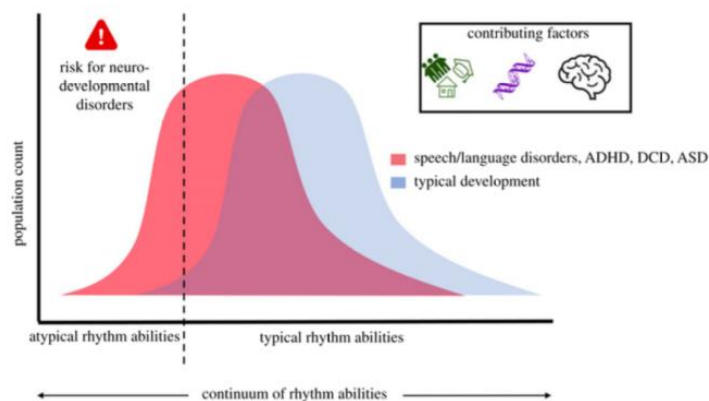


Figura 7 Una compromissione delle capacità di elaborazione del ritmo può essere un fattore di rischio per lo sviluppo di una varietà di NDD e può aiutare a spiegare alti livelli di comorbidità tra i disturbi (tratto da Lense, 2021).

Combinando questi risultati, l'ARRH suggerisce che le abilità ritmiche dovrebbero essere incluse nei programmi di screening precoce come indice dello sviluppo del linguaggio.

2.4 Training ritmico-musicali per la letto-scrittura

L'individuazione precoce delle abilità ritmiche atipiche, suggerita da Ladanyi et al., (2020), rende necessario lo sviluppo di interventi che sostengono l'acquisizione del linguaggio.

Poiché come affermato da Conway et al. (2009), il suono, e più in generale il ritmo, rappresenta un segnale sequenziale e temporale che può rappresentare uno *scaffolding* uditivo per consentire un adeguato sviluppo di capacità cognitive di base e avere effetti positivi a cascata sullo sviluppo di capacità più elevate, l'implementazione di interventi ritmico-musicali potrebbe essere un valido strumento per sostenere il processo di acquisizione del linguaggio.

Le numerose evidenze a sostegno di un deficit temporale nella Dislessia Evolutiva (Goswami, 2011; Stein, 2019), hanno portato allo sviluppo di diversi interventi ritmico-musicali con l'obiettivo di supportare, tramite il miglioramento delle capacità di elaborazione temporale, le abilità linguistiche cruciali per la lettura quali segmentazione e consapevolezza fonologica (Blythe, 1998; Overy, 2003; Bonacina et al., 2015; Cancer et al., 2019; Cancer et al, 2020).

La stretta relazione tra ritmo e corpo e l'esistenza di una forte interazione dinamica tra percezione e azione suggeriscono che il ritmo, attraverso la naturale e spontanea tendenza a sincronizzarsi con esso, possa fungere da segnale esterno che guida i movimenti, nello specifico quelli coinvolti nella scrittura (Véron-Delor et al., 2017).

Numerosi studi hanno dimostrato effetti della percezione del ritmo sulle capacità motorie in pazienti affetti da disturbi neurodegenerativi come il Parkinson (Calabrò et al., 2019) e da disturbi neurologici conseguenti a lesioni cerebrali (Van-Vugt, 2014).

L'utilizzo della stimolazione uditiva ritmica (RAS) nella malattia di Parkinson sembra migliorare le prestazioni dell'andatura, modificando i parametri chiave quali velocità e lunghezza del passo (Thaut etl al., 2018) attraverso un rimodellamento dei ritmi sensorimotori mediato dal cervelletto (Calabrò et al., 2019).

Prove moderate del miglioramento della velocità e della lunghezza del passo dopo l'allenamento dell'andatura con musica ritmata sono state trovate anche in pazienti con ictus (Wittwer, 2013).

Oltre ad influenzare la locomozione, il ritmo ha un effetto anche sulle abilità fino-motorie, lo studio di Van Vugt (2014) ha infatti mostrato effetti significativi della musica durante

l'allenamento su un compito di tapping in pazienti post-ictus. In linea con questo studio troviamo anche quello di Tong et al., (2015), gli autori proponendo un trattamento musicale “muto” e confrontandolo con una stimolazione musicale, sono stati in grado di indagare il suono musicale come fattore indipendente, dimostrando che la musica può svolgere un ruolo unico nel migliorare la funzione motoria degli arti superiori nei pazienti post-ictus.

Il ritmo sembra utile anche per modulare i movimenti oculari (Lange et al., 2018) e migliorare la coordinazione occhio-mano, fondamentali per scrivere.

Pertanto, se si dimostra l'effetto della musica e del ritmo su diversi comportamenti motori, possiamo legittimamente pensare che anche la scrittura possa trarne beneficio.

Gli studi che hanno indagato la dimensione ritmica della scrittura sono pochi, tra questi oltre a quelli già citati di Pagliarini et al., (2017), troviamo il recente studio di Frey et al., (2022). In questo studio gli autori hanno sottoposto un gruppo di bambini della scuola dell'infanzia (5-6 anni) ad un allenamento ritmico (gruppo sperimentale) e i restanti ad un allenamento artistico (gruppo di controllo), per dieci settimane.

Prima e dopo l'addestramento, sono state valutate le abilità cognitive generali (memoria di lavoro, memoria a breve termine, vocabolario, abilità non verbale), le abilità ritmiche (compiti di sincronizzazione e discriminazione) le abilità di alfabetizzazione (abilità fonologiche e abilità di ortografia inventata) e infine le abilità grafomotorie tramite una tavoletta digitale (leggibilità della scrittura delle lettere, qualità della copiatura delle forme geometriche).

I risultati hanno mostrato correlazioni tra le abilità ritmiche e di alfabetizzazione del bambino, nonché tra la sincronizzazione del ritmo e la pressione della penna. Inoltre, l'allenamento ritmico ha mostrato un miglioramento delle abilità ritmiche, ma questo non si è trasferito all'alfabetizzazione o allo sviluppo grafo-motorio (a parte un aumento significativo della durata delle pause in entrambi i gruppi al post-test, con un miglioramento maggiore per il gruppo del ritmo). Le possibili spiegazioni del mancato effetto di trasferimento riguardano la durata dell'intervento e la popolazione che in questo caso era tipica.

Per quanto riguarda gli studi sull'utilizzo del ritmo per migliorare le abilità di scrittura in popolazioni cliniche come bambini con DSA (con disgrafia evolutiva), ritroviamo solo lo studio “single-case” di Vèron-Delor et al. (2017) che ha dimostrato che ascoltare musica

ritmica in sottofondo durante un compito di scrittura migliora significativamente la durata, la velocità e la fluidità dei movimenti in un bambino con gravi difficoltà di scrittura di prima elementare.

Attualmente il trattamento della disgrafia viene attuato a partire da due approcci, il primo sostiene una didattica esplicita della grafia ossia un intervento riabilitativo strutturato sui raggruppamenti per famiglie di lettere, sull'esplicitazione della direzione dei tratti che le compongono, con dimostrazione visiva e verbale, sul recupero del corretto pattern motorio attraverso la copia e la riproposizione a memoria; il secondo si basa sull'insegnamento di strategie fino-motorie ritenute fondamentali per lo sviluppo della scrittura. Il primo approccio si rileva più utile nel migliorare la leggibilità del tratto grafico e la rapidità di scrittura per cui si suggerisce di non utilizzare in maniera esclusiva un intervento sulle abilità fini motorie o cinestesiche (LG-ISS, 2022, p. 338).

Poiché le abilità di trascrizione, finché non vengono automatizzate, consumano molte risorse cognitive, la presenza di un buon controllo grafomotorio fin dalla scuola dell'infanzia può facilitare il bambino nell'acquisizione dei pattern motori di formazione delle lettere e dell'ortografia.

La conduzione di studi che chiariscano l'effetto della musica e in particolare del ritmo, sulle abilità grafo-motorie alla base della scrittura è fondamentale per validarne l'uso in contesti riabilitativi ma non solo, attività di pregrafismo combinate con la musica potrebbero, ad esempio, essere proposte nella scuola dell'infanzia per promuovere le abilità grafo-motorie dei bambini, offrendo un quadro di apprendimento originale e giocoso.

A partire da questa letteratura, lo studio empirico da me condotto ha voluto indagare l'accuratezza del processo di scrittura manuale mediante l'uso di pregrafismi. Si sono inizialmente confrontate le performances grafo-motorie di bambini con Disturbo Specifico di Apprendimento (DSA) e bambini a sviluppo tipico. Successivamente si è valutato l'effetto di un priming ritmico-musicale sul processo di scrittura manuale nei medesimi compiti di pregrafismo, in relazione alle abilità di "finger tapping", nella popolazione atipica.

3 Lo studio empirico: l'effetto delle abilità ritmiche sulla scrittura manuale in bambini con Dislessia Evolutiva

3.1 Introduzione allo studio e domanda di ricerca

Il linguaggio è un'abilità cognitiva di alto livello con una lunghissima traiettoria evolutiva che ha inizio nell'ultimo trimestre di gravidanza e termina attorno ai dieci anni con l'automatizzazione delle abilità di letto-scrittura. All'interno di questa traiettoria evolutiva, in linea con l'approccio neurocostruttivista, differenti processi di base rintracciabili nei sistemi percettivo, attentivo, mnestico e motorio interagiscono con i fattori ambientali. Disfunzioni a carico di questi meccanismi possono portare a traiettorie evolutive atipiche che esitano in deficit di linguaggio e della letto-scrittura.

La recente diffusione della prospettiva dell'*Embodied Cognition* ha accresciuto l'interesse per il ruolo del corpo nella cognizione, promuovendo numerosi studi che hanno contribuito a confermare uno stretto legame tra il dominio linguistico e motorio, poiché in entrambi i domini è cruciale la dimensione temporale, una linea di ricerca ha proposto che il loro legame sia mediato dal ritmo (Pagliarini et al., 2015).

Studi di neuroimaging hanno infatti mostrato che i circuiti neurali alla base della percezione e produzione del ritmo coinvolgono aree corticali e sottocorticali tradizionalmente associate al sistema motorio e linguistico (Patel, 2021), inoltre, sono state documentate prestazioni peggiori in compiti di timing non linguistici, tra cui battere le mani a tempo di metronomo, riprodurre ritmi e codificare correttamente ritmi motori e uditivi in soggetti con disturbi del neurosviluppo che causano sia difficoltà linguistiche che di movimento quali Dislessia Evolutiva, Disturbo Primario di Linguaggio, Balbuzie, Disturbo della Coordinazione Motoria e Autismo (Ladányi et al., 2020).

Il corpus più ampio di studi riguarda la Dislessia Evolutiva (DE), si ritiene che alla base delle difficoltà riscontrate nel disturbo vi sia proprio un deficit temporale la cui presenza è confermata sia da studi neurofisiologici che da studi comportamentali (Goswami, 2011, TSF). Per esempio, Wolf (2002) ha dimostrato che gli studenti dislessici riportano abilità ritmiche atipiche in compiti di "finger tapping" e difficoltà nel riprodurre ritmi di toni strutturati separati da una sequenza di intervalli lunghi e brevi.

Linee di evidenza convergenti hanno trovato un'associazione tra sensibilità ritmica motoria e uditiva e alfabetizzazione, confermando che bambini e adulti che hanno

difficoltà a sincronizzarsi con un ritmo hanno una codifica neurale carente del suono e presentano difficoltà di lettura (Thomson e Goswami, 2008).

Sebbene gli studi sulla DE si siano concentrati soprattutto sui deficit visivi, uditivi e fonologici per spiegare le carenze abilità di lettura, sono state ampiamente documentate anche difficoltà fini e grosso-motorie, e difficoltà nel generare sequenze di movimenti veloci e ricorrenti che hanno portato Nicolson et al., (2001) ad ipotizzare la presenza di un deficit cerebellare (CDT).

Un'attività motoria fine che richiede la generazione di eventi rapidi e ripetuti ed è governata da principi di organizzazione ritmica (omotetia e isocronia) è la scrittura manuale o "language by hand" che può essere definita non solo come una successione di tratti isolati, ma piuttosto come un processo organizzato in cui convergono abilità motorie e linguistiche e dove il tempo e lo spazio di ciascuna unità motoria (cioè i tratti, le lettere e le parole) sono interdipendenti l'uno dall'altro all'interno di un'unità più ampia (Frey et al., 2022).

Nella *Dislessia Evolutiva* si riscontra un'elevata comorbidità con la *Disgrafia Evolutiva* che è il disturbo specifico della realizzazione grafica e, anche nei casi in cui la disgrafia non viene diagnosticata, sono comunque state dimostrate differenze significative nell'abilità di scrittura rispetto a bambini a sviluppo tipico (Barrientos et al., 2017) e una mancata aderenza ai principi ritmici della scrittura (omotetia e isocronia) (Pagliarini et al., 2015).

Sebbene l'interesse per il ruolo del ritmo nell'acquisizione del linguaggio parlato e della lettura in popolazioni tipiche e atipiche sia cresciuto negli ultimi anni, pochissimi studi indagano la relazione tra le abilità ritmiche e la scrittura. Per esempio, in letteratura troviamo una serie di studi sull'effetto dell'allenamento ritmico e della breve esposizione a stimoli ritmici in compiti di priming solo sulle abilità uditive e in relazione a stimoli linguistici (Bonacina et al., 2020; Cancer et al., 2016). Tali studi mostrano facilitazioni a livello comportamentale e neurofisiologico sull'elaborazione del parlato a livello fonemico, sillabico e sintattico e miglioramenti nella lettura sia in popolazioni tipiche che atipiche (Fiveash et al., 2020) ma non indagano un possibile effetto sulle abilità motorie coinvolte nella scrittura manuale.

Nonostante ciò, prove dell'efficacia della stimolazione ritmica sul sistema motorio sono riscontrabili in studi condotti su pazienti adulti post-ictus o con malattie

neurodegenerative come il Parkinson (Calabrò et al., 2019) dove si dimostrano a livello comportamentale e neurofisiologico, miglioramenti nelle abilità grosso e fino motorie e cambiamenti indicativi di una miglior connettività corticale e di una maggior attivazione delle aree motorie (Altemüller et al., 2009).

In conclusione, studiare la relazione tra ritmo e scrittura all'interno della DE può aiutarci a capire se il deficit temporale sostenuto dal Temporal Sampling Framework (TSF) di Goswami, può essere considerato un fattore transdiagnostico in grado di spiegare tutte le difficoltà presenti nel disturbo, compresi i deficit motori e di scrittura che, sebbene meno indagati, sono spesso riscontrabili in tale popolazione assieme ai classici deficit di lettura.

Obiettivi dello studio

All'interno di questa cornice teorica di riferimento, il presente studio si focalizza sulla scrittura manuale, intesa come un sistema linguistico complesso che consente di esplorare ulteriormente la relazione interdipendente tra ritmo, linguaggio e sistema motorio.

Gli obiettivi generali dello studio sono, in primo luogo, quello di indagare le differenze in termini di processo ovvero di analisi quantitativa di velocità e pressione media del tratto di scrittura tra un campione di bambini con Disturbi Specifici dell'Apprendimento e un gruppo di controllo di bambini a sviluppo tipico (Hp1). In secondo luogo, di valutare, nel campione atipico, l'effetto di un priming ritmico-musicale sul processo di scrittura manuale, in relazione alle abilità ritmiche di sincronizzazione uditivo-motoria dei soggetti (Hp2).

Per fare ciò è stato testato un campione di bambini dagli 8 agli 11 anni di età con diagnosi di Disturbi Specifici dell'Apprendimento (DSA). L'intervallo d'età scelto coincide con il raggiungimento dell'automatizzazione della scrittura manuale e con l'età minima per poter effettuare una diagnosi di DSA.

Il compito di scrittura, consistente in 4 compiti di pregrafismo con un gradiente di difficoltà crescente. Tale compito è stato scelto poiché ritenuto adatto ad isolare misure cinetico-cinematiche del gesto grafomotorio (Vaivre-Douret et al., 2021) e perché, escludendo l'utilizzo di parole, si è reso di pari difficoltà a bambini che presentano disturbi che interferiscono con le capacità di letto-scrittura, consentendoci di indagare eventuali difficoltà a livello di abilità motorie e ritmiche di base ipotizzate essere centrali nel disturbo.

Il compito di pregrafismo è stato eseguito su un tablet in cui è stata implementata un'applicazione che ha consentito di valutare l'efficacia del prodotto, tramite un'immagine di ogni prova, e del processo di scrittura registrando indici cinetico-cinematici. In particolare, nel presente studio ci siamo focalizzati sulla velocità media e la pressione media del tratto ed è stata indagata l'aderenza al principio di isocronia, ovvero il rapporto tra la velocità e la lunghezza dei movimenti (Pagliarini et al., 2015).

Per valutare l'effetto del priming ritmico-musicale sul processo di scrittura, i bambini del campione atipico hanno svolto il medesimo compito in due condizioni: nella condizione baseline, durante la quale ognuna delle quattro prove è stata preceduta da un suono musicale non ritmico (controllo), nella condizione priming, le prove sono state precedute da un priming ritmico-musicale che variava di prova in prova, in quanto simulava a livello acustico, le caratteristiche del pattern grafico.

Infine, l'abilità di sincronizzazione uditivo-motoria è stata valutata tramite una prova di *finger tapping* in cui i soggetti dovevano premere, con il dito indice della mano dominante, la barra spaziatrice della tastiera, in corrispondenza del suono di una campanella presentato a due velocità diverse 100 BPM (1,67Hz) e 150 BPM (2,5 Hz).

Ipotesi

Sulla base della letteratura esistente, si ipotizza che la performance di scrittura valutata, sia peggiore nel campione atipico rispetto al campione tipico. In particolare, prevediamo che i bambini DE con e senza *disgrafia evolutiva*, scrivano più lentamente e in modo meno fluente rispetto ai bambini a sviluppo tipico ed esercitino una pressione maggiore sullo schermo del tablet (Hp1).

La seconda ipotesi (Hp2) è che il priming ritmico-musicale, sfruttando l'accoppiamento uditivo-motorio, guidi l'organizzazione temporale dell'azione motoria, facilitando l'esecuzione grafo-motoria e migliorando gli indici processuali e i parametri ritmici di scrittura (isocronia) nella popolazione atipica. Inoltre, ci aspettiamo che le abilità di sincronizzazione audio-motoria, registrate tramite il "finger tapping test" modulino gli effetti del priming ritmico-musicale (Ladanyi, 2021; Frey et al., 2022).

3.2 Metodo

3.2.1 Soggetti

Hanno partecipato allo studio 7 bambini italiani, 3 maschi e 4 femmine dagli 8 agli 11 anni ($M=9,6$ e $DS=1,2$), reclutati in un centro specializzato nella presa in carico di bambini con disturbi di apprendimento della regione Emilia-Romagna. Tutti i bambini sono stati coinvolti previa autorizzazione e firma del consenso informato da parte dei genitori/tutori.

Nel dettaglio, il campione è formato da bambini con quoziente intellettivo nella norma, valutato mediante la scala di valutazione WISC-IV (Orsini, Pezzuti & Picone, 2012) e diagnosi di Disturbi Specifici dell'Apprendimento (ICD-10-F81). In tutti e sette i bambini la diagnosi principale è quella di Dislessia Evolutiva, due di essi presentano anche una diagnosi di Disgrafia Evolutiva mentre, in un caso, la mancata acquisizione dell'allografo corsivo ha impedito di approfondire la diagnosi di Disgrafia tramite l'uso della BHK (a cura di Di Brina & Rossini, 2021).

I dati dei bambini a sviluppo atipico sono stati confrontati con quelli di un campione tipico, che ha svolto il test pregrafico in un precedente lavoro di tesi (Sgolastra 2021). Tale campione era così formato: 25 bambini reclutati in due palestre di ginnastica artistica e in un centro culturale nella regione Marche. Tutti i bambini sono stati coinvolti a seguito di previa autorizzazione e firma del consenso informato da parte dei genitori/tutori. Nel dettaglio, il campione è formato da 3 maschi e 22 femmine la cui età media è di 7.6 anni ($DS= 1.2$).

Il protocollo di ricerca è stato approvato dal Comitato Etico del Dipartimento di Psicologia dello Sviluppo e della Socializzazione dell'Università di Padova. La ricerca è stata condotta in conformità con i principi della Dichiarazione di Helsinki.

3.2.2 Strumenti

Sia il *compito di prescrizione* che il *finger tapping test* sono stati eseguiti tramite l'utilizzo di un *iPad Air* di quarta generazione, dotato di una *Apple Pencil* di seconda generazione utilizzata per la scrittura e di una tastiera bluetooth utilizzata per il tapping. L'*iPad Air* ha un multitouch retroilluminato con LED da 10,9" (diagonale) e una risoluzione di 2360x1640 pixel a 264 ppi (pixel per pollice). L'*Apple Pencil* è sensibile all'inclinazione

e alla pressione e mentre la si usa è possibile appoggiare la mano sullo schermo del tablet come se fosse un vero foglio di carta. Il compito di prescrittura è stato inserito in un'applicazione sviluppata dall'ing. Luca Cossu che, oltre a consentire lo svolgimento della prova, ha permesso anche di raccogliere i dati del processo di scrittura.

Il *Finger Tapping Test* è stato implementato su LABVANCED, una piattaforma online che combina disegni di ricerca, somministrazione e registrazione dei dati in un unico software. Nello specifico è stata utilizzata la tecnologia "Precise Timing" che consente di registrare con precisione il momento in cui il soggetto risponde ad uno stimolo premendo la barra spaziatrice della tastiera. Per determinare quando si sono verificati il Punto A (inizio dello stimolo) e il Punto B (risposta del partecipante), l'app accede all'ora dall'orologio del computer e fornisce, per ogni partecipante, un "data report" contenente tutti i suoi tempi di risposta.

Per l'ascolto delle tracce audio nel compito di scrittura, sono state utilizzate delle cuffie on-ear Sony modello MDR-ZX110AP.

3.2.3 *Stimoli*

Il compito di prescrittura è stato creato mettendo insieme 4 stimoli pregrafici selezionati tra quelli presenti nel volume "Il corsivo dalla A alla Z: un metodo per insegnare i movimenti della scrittura. La pratica" (Blason et al., 2004). Gli stimoli pregrafici considerati "semplici" sono formati da disegni utili a focalizzare l'attenzione del bambino e da linee tratteggiate che rimandano ai movimenti alla base della formazione delle lettere (*Figura 8 e 9*).



Figura 8 Primo stimolo pregrafico selezionato (tratto da Blason et al., 2004)



Figura 9 Secondo stimolo pregrafico selezionato (tratto da Blason et al., 2004)

Anche gli stimoli pregrafici più complessi prevedono l'esecuzione dei movimenti alla base della formazione delle lettere, ma le tracce da seguire sono di dimensioni ridotte (Figura 10 e 11).



Figura 10 Terzo stimolo pregrafico selezionato (tratto da Blason et al., 2004)



Figura 11 Quarto stimolo pregrafico selezionato (tratto da Blason et al., 2004)

Tutti gli stimoli selezionati seguono un ordine di complessità crescente che anticipa il criterio di suddivisione delle lettere in 4 famiglie (le asole, le montagne, le punte, le tonde).

Per quanto riguarda la realizzazione delle 8 tracce musicali, utilizzate come stimoli di controllo (4) e di prime (4) nel compito di prescrittura, è stato utilizzato Audacity (versione 3.2.5), un programma gratuito per la creazione di tracce audio. I suoni di controllo sono casuali e non ritmici mentre i prime presentano una durata e un pattern ritmico-musicale che tenta di mimare le caratteristiche grafiche degli stimoli di prescrittura (Figura 12).

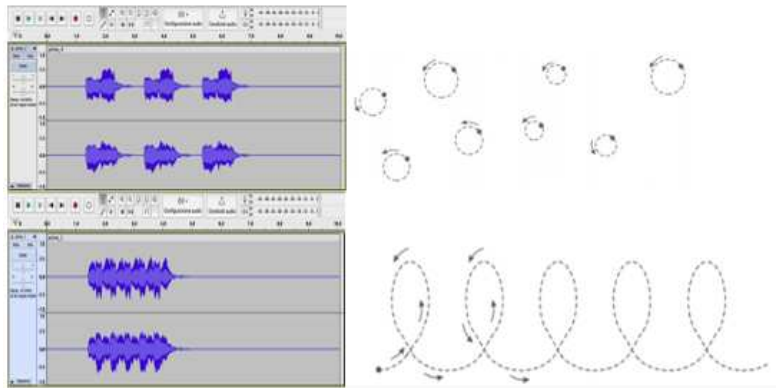


Figura 12 L'immagine raffigura le due tracce ritmico-musicali (prime) che precedono rispettivamente il quarto e il primo stimolo pregrafico

Gli stimoli acustici utilizzati nel compito di tapping sono stati costruiti con lo stesso programma (Audacity), utilizzando il suono di una campanella. La scelta di questo suono, altamente familiare, è legata al voler rendere più ecologico e divertente il test.

Sono state presentate 4 tracce con un ritmo isocrono a due velocità diverse, 2 lente a 1,67 Hz (ISI=625 ms) e 2 veloci a 2,5 Hz (ISI=400 ms). Si tratta di frequenze familiari al corpo umano e al linguaggio, in particolare l'intervallo interstimolo di 400 ms è vicino al tempo motorio spontaneo dei bambini mentre l'ISI di 600 ms è il periodo di riferimento per gli adulti.

L'uso di due velocità ci ha permesso di valutare la capacità di sincronizzazione generale piuttosto che la capacità di sincronizzarsi a una velocità specifica e ha eliminato la potenziale distorsione del tempo preferito di un individuo (Woodruff Carr et al., 2014). L'ordine di presentazione delle tracce era casuale.

3.2.4 Procedura

Ciascun bambino è stato testato individualmente, seduto ad una scrivania in una stanza tranquilla dello studio. La sessione sperimentale, per ogni partecipante, prevedeva l'esecuzione della prova di prescrittura seguita da quella di tapping.

Prima di iniziare la prova di prescrittura, il bambino veniva invitato a sedersi, mettersi comodo e a sistemare il tablet a proprio piacimento con lo scopo di rendere l'esecuzione del compito il più possibile ecologica e piacevole.

Al bambino venivano fatte indossare le cuffie ed era effettuata una prova audio per accertarsi che il volume fosse regolato correttamente, si proseguiva poi con la lettura della consegna: “Adesso sentirai un suono, poi, sull’ipad davanti a te vedrai apparire delle linee che dovrai ricalcare con questa penna, seguendole attentamente. Dopo, sentirai un altro suono e appariranno altre linee, tu dovrai sempre ascoltare il suono e poi ricalcare le linee”, specificando che il compito non aveva nessun limite di tempo.

Il compito di prescrizione veniva eseguito due volte nell’immediato, in tutti i casi, nella prima prova venivano utilizzati stimoli acustici non ritmici (controllo) mentre nella seconda prova stimoli ritmico-musicali (priming).

Successivamente, al termine della prova di scrittura, veniva chiesto al bambino di togliere le cuffie e venivano lette le istruzioni per il “finger tapping test”, i quattro trials del test venivano preceduti da uno di prova, per accertarsi che il soggetto avesse compreso la consegna.

3.3 *Analisi dei dati*

Prima di passare alla presentazione delle analisi e dei risultati si ritiene necessaria una breve premessa: l’analisi dei dati è stata eseguita tenendo ben presenti l’esiguità e variabilità del campione, limiti comuni nella ricerca in ambito di sviluppo atipico. Dunque, le seguenti analisi sono da intendere a livello esplorativo e ogni risultato va replicato ed esteso per poter essere generalizzato a livello di popolazione.

Finger Tapping Test

Le prestazioni di sincronizzazione vengono comunemente valutate esaminando la variabilità degli intervalli tra i colpi prodotti (variabilità *intertap*). Tuttavia, questa procedura si basa sul fatto che i partecipanti producano all’incirca un colpo per ogni battito del metronomo e pertanto non è adatta ad essere usata con le popolazioni più giovani, le cui prestazioni sono intrinsecamente più variabili. Di conseguenza, basandoci sugli studi di Kirschner et al., (2009) e Woodruff Carr et al., (2014), abbiamo misurato la capacità di sincronizzazione utilizzando le *circular statistics* (Pewsey et al., 2013).

A ciascun colpo sulla tastiera è stato assegnato un angolo di fase espresso in gradi, sottraendo il tempo di inizio del suono della campanella dall’inizio del colpo più vicino

nel tempo, dividendo poi il risultato per l'intervallo interstimolo (ISI) e moltiplicando per 360°.

Per la visualizzazione e l'analisi del dato, è stata applicata la libreria circular (Gu et al., 2014). Abbiamo quindi sommato tutti i vettori e diviso il risultato per il numero di colpi sulla tastiera prodotti, ottenendo un vettore medio R . L'angolo di questo vettore rappresenta la misura in cui il soggetto tende a precedere o seguire i suoni della campanella. La lunghezza del vettore R riflette la coerenza del battito, ovvero la tendenza dei partecipanti a mantenere una relazione temporale costante tra il suono della campanella e i colpi ed è stata calcolata facendo la media della sincronicità dei colpi del partecipante in ciascuna delle due prove su entrambe le frequenze.

Per determinare se un partecipante si stava sincronizzando in modo significativo con uno stimolo è stato applicato il *test di Rayleigh* che verifica la coerenza nella fase delle risposte rispetto a una distribuzione uniforme attorno al cerchio, tale test è stato applicato all'insieme di tutti i vettori prodotti nelle due prove per una data frequenza. Le due prove sono state combinate per calcolare il valore P di *Rayleigh* per ciascuna frequenza (1,6 e 2,5 Hz). È stato poi calcolato un valore medio per ricavare un indice complessivo di sincronizzazione di ogni soggetto.

Compito di prescrizione

Nel presente studio gli indici cinetico-cinematici (velocità e pressione media del tratto) sono stati analizzati con il software R open source (R Core Team, 2022) mediante modelli lineari generalizzati a effetti misti (Nieuwenhuis et al., 2012; Fox, 2015, GMLER) che incorporano sia parametri a effetti fissi che effetti casuali.

È noto che questo approccio statistico affronti adeguatamente le questioni metodologiche comuni alla ricerca, tra cui le dimensioni ridotte del campione, il numero ridotto di osservazioni per studio e partecipante e l'elevata variabilità individuale dovuta a fattori cognitivi e di maturazione (Oakes, 2017). Inoltre, GMLER consente di specificare la famiglia di distribuzione, superando l'ipotesi ANOVA di residui normalmente distribuiti con variabilità uniforme tra i livelli dei predittori (Fox, 2015).

Per testare la prima ipotesi riguardante la differenza tra gli indici processuali di scrittura in una popolazione tipica e atipica, abbiamo costruito due modelli lineari (velocità e pressione) in cui sono stati inseriti gli indici cinetico-cinematici come variabile

dipendente e l'appartenenza al gruppo (tipico o atipico) come predittore categoriale a effetto fisso, al quale è stato aggiunto l'effetto random legato alla variabilità individuale dei soggetti.

Per testare la seconda ipotesi riguardante il ruolo delle abilità ritmiche e di un priming ritmico-musicale sugli indici cinetico-cinematici del gruppo atipico è stato realizzato un terzo modello lineare in cui, oltre al predittore categoriale gruppo (prime e non prime), è stato aggiunto il predittore continuo relativo alla difficoltà di sincronizzazione, e gli effetti random legati alla variabilità individuale dei soggetti.

Infine, per testare il principio ritmico dell'isocronia, abbiamo indagato la variabile dipendente durata del tratto, in un modello che ha considerato due predittori continui ossia la distanza e la difficoltà di sincronizzazione, in aggiunta alla variabilità tra individui.

3.4 Risultati

I risultati verranno presentati per i dati relativi alle analisi degli indici cinetico-cinematici nel compito di prescrizione in funzione delle ipotesi sperimentali.

Ipotesi 1: il campione atipico ha performances peggiori in termini di indici cinetico-cinematici (velocità e pressione).

Dall'analisi dei modelli GLMER implementati (a e b) non emergono differenze significative a livello statistico, né per la velocità media né per la pressione. Probabilmente questi risultati sono causati dalla diversa numerosità campionaria e dall'alta variabilità individuale del campione atipico.

A livello descrittivo, emerge una tendenza riguardo alla pressione media per gruppo, che sembra aumentare per i bambini del gruppo tipico (*figura 13*).

Modello GLMER:

a) *Velocità* ~ gruppo + (I|sogg)

b) *Pressione* ~ gruppo + (I|sogg)

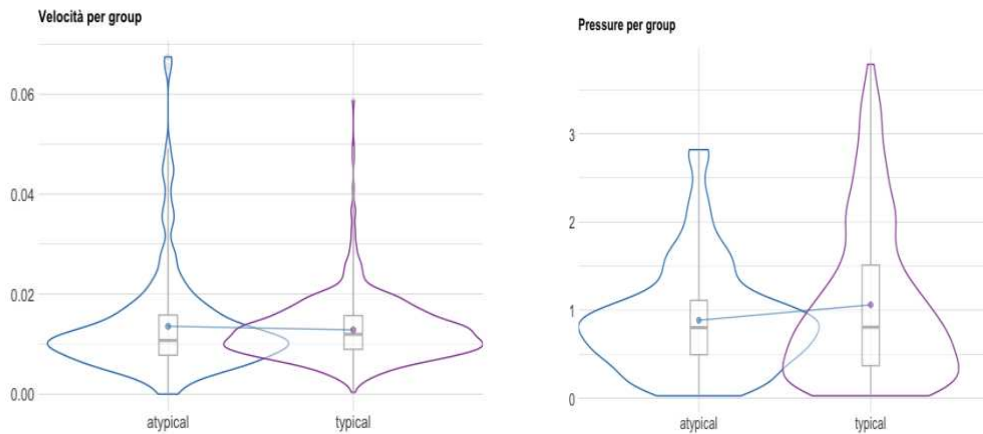


Figura 13 Statistiche descrittive della velocità e della pressione media per gruppo tipico e atipico

Ipotesi 2: le abilità ritmiche di base hanno un ruolo nelle performances del gruppo atipico, nello specifico: un priming ritmico e le abilità di sincronizzazione contribuiscono a spiegare i dati di scrittura.

Il modello GLMER per l'analisi della velocità media (c) indica un'interazione significativa tra l'effetto del priming e le abilità di sincronizzazione ($b=0.02$, $SE=0.01$, $t=-0.03$, $p=0.003$) sulla velocità media al netto delle differenze individuali (Figura 14). Secondo il modello, la presenza del prime (sessione 2) sembra aumentare la velocità media del tratto dei bambini che hanno maggiori difficoltà di sincronizzazione (maggior livelli di *avg_tot*).

Modello GLMER:

*c) Velocità \sim priming * difficoltà sincronizzazione + (I|sogg)*

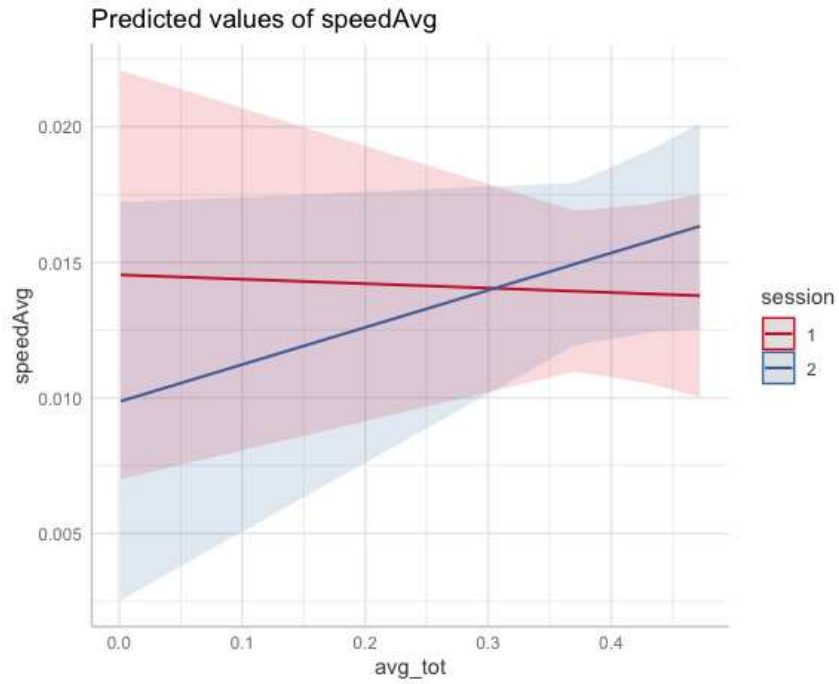


Figura 14 Grafico degli effetti del modello che mostra i valori previsti della velocità media nella sessione prime e non prime in funzione delle abilità di sincronizzazione

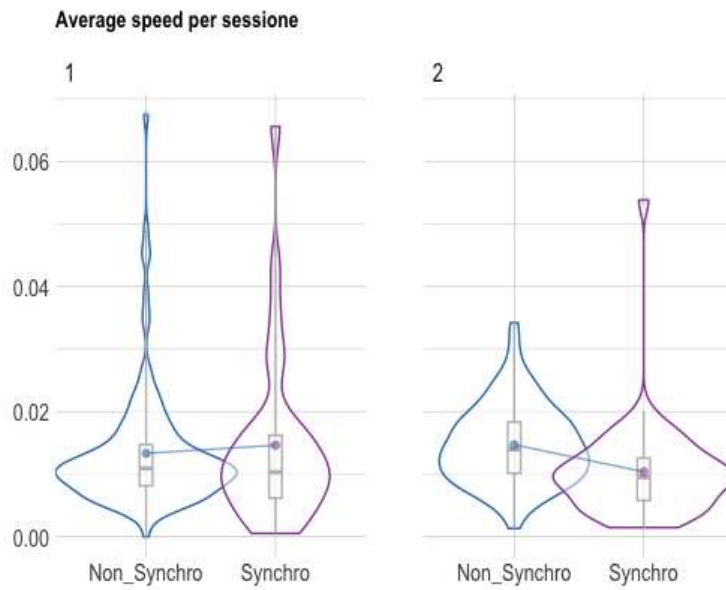


Figura 15 Statistiche descrittive della velocità media per sessione (no prime e prime) e abilità di sincronizzazione

Parallelamente, anche il modello per la pressione media predice un effetto significativo dell'interazione tra abilità di sincronizzazione ed effetto del priming ($b=0.99$, $SE=0.40$,

$t = -1.58, p = 0.001$). In particolare, secondo il modello, la pressione media aumenta nella condizione di priming per i bambini con maggior difficoltà di sincronizzazione (Figura 16).

Modello GLMER:

*d) Pressione \sim priming * difficoltà sincronizzazione + (1|sogg)*

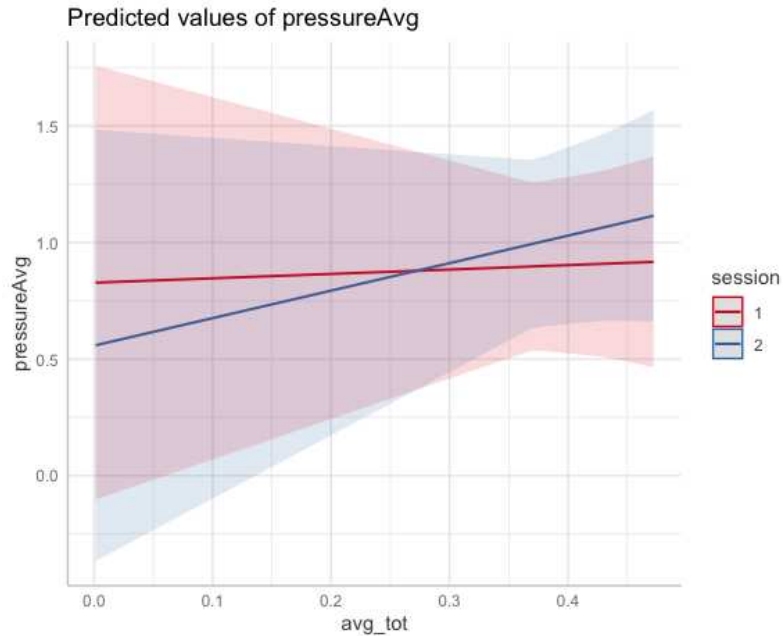


Figura 16 Grafico degli effetti del modello che mostra i valori previsti della pressione media nella sessione prime e non prime in funzione delle abilità di sincronizzazione

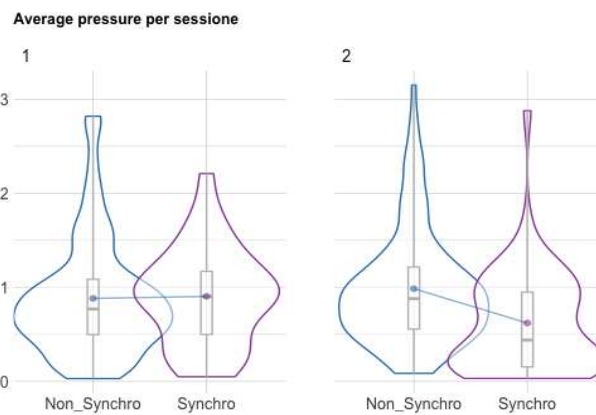


Figura 17 Statistiche descrittive della pressione media per "sessione" e "abilità di sincronizzazione"

E' stato poi specificato un modello per valutare l'effetto delle abilità di sincronia sull'aderenza al principio ritmico dell'isocronia. Il modello predice che i bambini con

minori abilità di sincronizzazione producano un aumento di durata maggiore, rispetto ai sincronizzatori più efficaci, nel produrre segmenti più lunghi, violando così il principio di isocronia ($b=-7.21$, $SE=-13.69$, $t= -0.72$, $p=0.029$). Non emergono invece effetti significativi del priming ritmico.

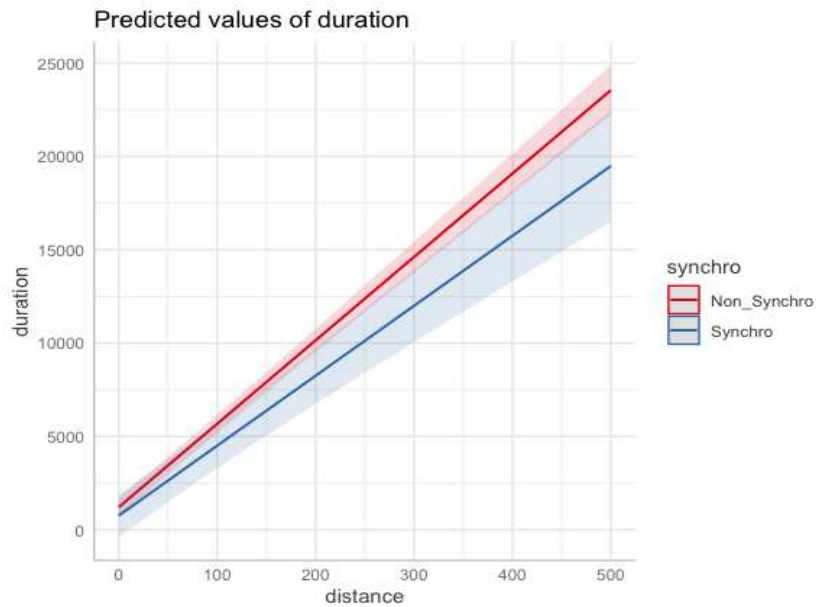


Figura 18 Grafico che predice gli effetti della sincronizzazione sull'isocronia (relazione tra durata del movimento e distanza percorsa)

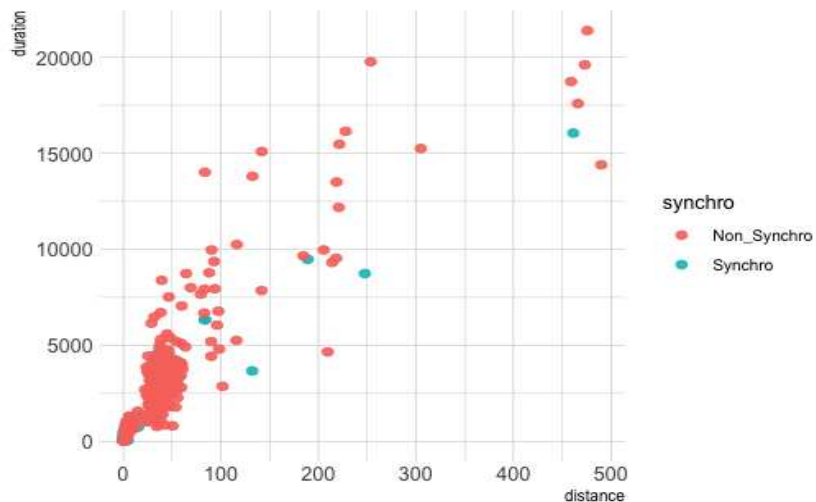


Figura 19 Statistica descrittiva dell'isocronia (relazione tra durata del movimento e distanza percorsa) nei soggetti che si sincronizzano e in quelli che non si sincronizzano

4 Discussione

Il ruolo dei processi sensorimotori e del ritmo nell'acquisizione del linguaggio è un campo di ricerca promettente che ha indotto gli studiosi ad investigare in maniera approfondita le relazioni tra abilità ritmiche e il linguaggio parlato e letto, sia in popolazioni tipiche che atipiche (Brandt et al., 2012; Flaugnacco et al., 2014; Bonacina et al., 2018; Steinbrink et al., 2019; Frey et al., 2022; Sun et al., 2022). In questo contesto di ricerca, dato lo stretto legame tra lettura e scrittura, il nostro studio sperimentale ha mirato a esplorare il ruolo del ritmo nelle abilità di scrittura manuale, in un campione atipico con Disturbi Specifici dell'Apprendimento (DSA). Sebbene quest'area di ricerca sia relativamente poco esplorata (Ben-Pazi et al., 2007; Pagliarini et al., 2015), i nostri risultati preliminari indicano un legame promettente tra ritmo e scrittura manuale, suggerendo la necessità di approfondire ulteriormente questo campo.

In aggiunta all'aspetto esplorativo del nostro studio, è importante sottolineare che i risultati non solo contribuiscono a una migliore comprensione delle relazioni tra ritmo e linguaggio, ma hanno implicazioni ulteriori. La scrittura manuale, infatti, rappresenta non solo un sistema linguistico ma anche un'abilità fino-motoria. Questa ricerca, dunque, si propone di gettare luce anche sulle relazioni tra il ritmo e il sistema motorio nell'ambito dell'acquisizione del linguaggio e della scrittura manuale.

Per esaminare le ipotesi del nostro studio, abbiamo coinvolto un campione di sette bambini con DSA tra gli 8 e gli 11 anni, in una sessione sperimentale mirata all'analisi delle loro abilità grafo-motorie e delle loro abilità ritmiche tramite un compito di pregrafismo e un compito di finger tapping. Al fine di condurre un'analisi quantitativa delle prestazioni, abbiamo digitalizzato la registrazione di entrambi i compiti.

La valutazione della scrittura ha riguardato due indici cinetico-cinematici (la velocità e la pressione media del tratto) e una componente ritmica denominata isocronia (Pagliarini et al., 2015). Per raccogliere questi dati abbiamo usato un iPad dotato di tastiera e una penna wireless.

Per l'analisi dei dati, abbiamo applicato modelli generalizzati a effetti misti che ci hanno permesso di stimare l'effetto dei predittori, tenendo conto della varianza tra i partecipanti e le diverse componenti dell'esperimento.

Prima di indagare il legame tra abilità ritmiche e scrittura manuale, abbiamo ritenuto opportuno confrontare gli indici processuali di scrittura rilevati nel nostro campione atipico con quelli registrati in precedenza in un campione tipico (Sgolastra, 2022), per portare prove a conferma della presenza di un deficit di scrittura, non rilevabile con i classici test carta e matita, nei soggetti con DE. A differenza di quanto riportato in letteratura (Barrientos et al., 2017), non sono emerse differenze statisticamente significative nelle performance dei due gruppi. Questa assenza di differenze statistiche può essere in gran parte attribuita alla limitata numerosità (7 partecipanti) e alla notevole variabilità individuale all'interno del campione atipico.

Tuttavia, da un'analisi descrittiva, si nota una tendenza nei dati relativamente alla pressione media esercitata con la penna sul foglio, con un aumento apparente nei bambini del gruppo tipico. È importante sottolineare che al momento la letteratura sullo sviluppo della pressione della penna è ancora limitata e contraddittoria. Ad esempio, Rueckriegel et al. (2008) hanno riportato una correlazione positiva tra la pressione e l'età in bambini con sviluppo tipico, mentre Lin et al. (2015) hanno riscontrato una diminuzione generale dei valori di pressione media con l'avanzare dell'età.

La differenza di età tra i due campioni, con il gruppo tipico composto da bambini più giovani, potrebbe spiegare questa discrepanza nei dati.

Secondo Kalid et al., (2010) la differenza di pressione media non è un buon indice di differenziazione tra bambini con difficoltà di scrittura e bambini con sviluppo tipico, suggerendo che la variabilità della pressione esercitata sulla penna può essere una misura discriminante più efficace. In ogni caso tale indice cinetico è influenzato sia dalla complessità del compito che dalla variabilità interindividuale e sue variazioni possono riflettere un tentativo strategico di aumentare il controllo della scrittura manuale al fine di ottimizzare le prestazioni.

Nonostante i dati rilevati non confermino la prima ipotesi, ci consentono di effettuare una riflessione significativa sul fatto che gli strumenti e i test sofisticati che la ricerca continua a perfezionare nel tempo, le misurazioni continue, gli indici di processo e di prodotto, nonché le analisi multifattoriali, insieme ai progressi nel campo statistico, stanno mettendo in luce quanto sia poco realistico l'approccio basato su rigidi valori di cut-off per la classificazione delle popolazioni. Anche quando si testa un campione relativamente ridotto, composto da soli 7 soggetti, concentrandosi su abilità specifiche come la velocità

e la pressione media del tratto, emergono notevoli variazioni tra i partecipanti. Questa variabilità interindividuale è informativa in quanto evidenzia che un deficit apparentemente uniforme come la dislessia evolutiva è spesso il risultato di una serie di differenti atipie a livello di abilità di base. Pertanto, quando analizziamo le competenze che supportano abilità complesse come la scrittura (ad esempio, velocità e pressione media del tratto), stiamo effettivamente esaminando le strategie di adattamento sviluppate durante anni di apprendimento.

La significativa variabilità interindividuale registrata non solo nel nostro campione ma anche in generale negli studi condotti su popolazioni atipiche fornisce un importante contributo informativo che merita un'approfondita esplorazione. È fondamentale domandarsi cosa determina l'efficacia di una strategia di adattamento rispetto a un'altra e perché alcuni individui riescono a sviluppare tali strategie con successo mentre altri no.

Nel presente elaborato, abbiamo seguito i passi delle più recenti formulazioni in ambito di ritmo e dislessia (Goswami et al., 2011). Abbiamo quindi ipotizzato che un deficit a livello di abilità ritmiche di base possa essere non solo impattante sulle abilità di organizzazione motoria nel processo di handwriting ma possa anche modulare la performance. In particolare, sono state valutate (i) le abilità ritmiche di base dei soggetti attraverso un test di sincronizzazione e l'effetto di (ii) un cue ritmico cross-modale concorrente alla prova attraverso un test di priming. Se un deficit di abilità ritmiche è connesso alle abilità di handwriting, ci aspettiamo che un cue ritmico (i.e., priming ritmico) possa essere efficace nel sostenere soprattutto i soggetti con maggiori difficoltà (i.e., livelli più bassi di sincronizzazione). I risultati confermano questa ipotesi.

Non solo i bambini con maggiori difficoltà di sincronizzazione falliscono nel rispettare il principio di isocronia nell'organizzazione ritmica dell'handwriting, ma il priming ritmico aiuta proprio questi soggetti in termini di aumentata velocità (indice positivo di fluidità di esecuzione) e pressione media (strategia di adattamento).

Inoltre, a livello descrittivo possiamo notare che la distribuzione della velocità media di tratto dei bambini con problemi di sincronizzazione è molto più dispersa in assenza del priming ritmico rispetto alla condizione in cui esso è presente. Questo suggerisce che la performance motoria dei “cattivi sincronizzatori” tende a uniformarsi maggiormente quando il priming ritmico è presente.

L'aumento di velocità è un dato interessante, poiché la letteratura ha spesso riportato una velocità media più bassa nei compiti di disegno e scrittura in bambini con DE, sia con che senza disgrafia, rispetto ai bambini tipici (Galli et al., 2011; Pagliarini et al., 2015).

Per quanto riguarda l'aumento di pressione della penna in presenza del priming facendo riferimento agli studi di Lin et al., (2015) e agli studi di Schoemaker et al. (2005) sull'aumento di pressione in bambini con disgrafia evolutiva durante compiti di scrittura protratti, possiamo considerarlo come una strategia adattiva per migliorare l'acquisizione del controllo e della motricità fine nella scrittura. Questa strategia motoria potrebbe rappresentare un "meccanismo compensatorio" attuato consapevolmente dai soggetti con DSA per fronteggiare un possibile deficit procedurale cerebellare che ostacola l'automatizzazione della scrittura (Schoemaker et al., 2005; Adi-Japha et al., 2007).

La breve stimolazione ritmica rappresenta un elemento fondamentale nella nostra indagine. La letteratura esistente ha indagato gli effetti di un'esposizione a breve e lungo termine al ritmo soprattutto sull'elaborazione uditiva dei segnali del linguaggio, trascurando il possibile impatto sugli effettori motori, soprattutto in età evolutiva.

Nel presente studio, utilizzando un compito di pregrafismo abbiamo isolato le abilità grafo-motorie da quelle linguistiche, allo scopo di analizzare l'effetto del ritmo sulle prime.

Sebbene il nostro studio si limiti ad indagare gli effetti comportamentali del ritmo, è cruciale comprendere i meccanismi neurali che permettono a questa stimolazione di influenzare gli indici cinetico-cinematici durante la scrittura.

Gli studi di priming attribuiscono l'effetto del ritmo al fenomeno del "trascinamento neurale" in cui le oscillazioni neurali endogene, che riflettono l'eccitabilità corticale, si accoppiano ai segnali ritmici esterni e persistono per un breve periodo anche dopo la cessazione del segnale, consentendo al sistema cognitivo di anticipare eventi futuri migliorando l'elaborazione delle componenti salienti del segnale (Jones, 2018, DAT).

In linea con la concezione di Jones (2018) che ritiene la dimensione temporale una dimensione strutturante fondamentale della mente, l'effetto del priming ritmico non si limita alla corteccia uditiva ma ha un impatto cross-modale, coinvolgendo diverse modalità sensoriali. Infatti, una rappresentazione interna dei modelli ritmici percepiti sembra guidare la successiva elaborazione degli stimoli indipendentemente dalla modalità sensoriale di codifica.

Con il nostro studio, poiché il priming melodico migliora le successive prestazioni motorie, dimostriamo che la dinamica cross-modale del priming ritmico oltre ad andare dal sistema motorio a quello uditivo (Stephan et al., 2016) va anche nella direzione opposta cioè dal sistema uditivo a quello motorio.

Nell'interazione tra diverse modalità sensoriali un ruolo significativo è svolto dall'*entrainment neurale* che come sostenuto nel modello PRISM da Fiveash et al. (2021) sostiene l'accoppiamento sensori-motorio rafforzando la comunicazione tra corteccia uditiva e motoria.

Un aspetto cruciale da considerare è che nelle aree motorie la banda ritmica predominante è *beta* che aumenta durante la preparazione motoria e diminuisce con l'inizio dell'azione. L'accoppiamento della banda *beta* con le oscillazioni nella banda *Delta* nella corteccia premotoria sinistra sembra inoltre guidare l'elaborazione sensorimotoria predittiva del linguaggio e del ritmo (Keitel et al., 2018).

Queste evidenze si collegano alla letteratura esistente sui correlati neurali della scrittura manuale (Longchamp et al., 2005) e del processamento del ritmo (Patel, 2021) che dimostrano che l'ascolto di un suono ritmico può attivare diverse aree motorie, tra cui la corteccia premotoria sx, situata nell'area di Exner (Palmis et al., 2017). L'area di Exner è particolarmente significativa in quanto contiene i "programmi motori" necessari per la scrittura manuale svolgendo un ruolo cruciale nell'interfacciare le rappresentazioni ortografiche e grafemiche con le sequenze complesse di movimento necessarie per la produzione di lettere e parole. Poiché tali sequenze di movimento sono intrinsecamente organizzate nel tempo e nello spazio secondo principi ritmici, una regolarità ritmica esterna potrebbe fungere da riferimento temporale, agevolando la pianificazione e l'esecuzione motoria, soprattutto nei soggetti con deficit di timing.

In altre parole, il riferimento temporale fornito dal priming ritmico che emula le caratteristiche del pattern grafico del compito di pregrafismo, potrebbe mettere il sistema motorio in uno stato di prontezza, fornendo segnali temporali prevedibili che consentono l'anticipazione del movimento e la pianificazione motoria basata sulle aspettative riguardo la durata dei segnali temporali. Questo processo ottimizza tutti gli aspetti del controllo motorio (Schaefer, 2014).

Poiché la corteccia premotoria sembra essere coinvolta nella previsione di sequenze di stimoli sensoriali ogni volta che sono rilevanti per il sistema motorio e presenta un legame

diretto con le aree uditive, le melodie intese come sequenze di stimoli rilevanti per il movimento, potrebbero essere trasformate in rappresentazioni motorie proprio da tale area cerebrale. Pertanto, nel presente studio l'ascolto di un prime ritmico-musicale correlato al movimento potrebbe indurre una rappresentazione della memoria motoria feed-forward che facilita le prestazioni motorie.

I processi sopra delineati ci consentono di fornire una possibile spiegazione del perché il priming ritmico abbia migliorato gli indici cinetico-cinematici. Come previsto nelle ipotesi, l'effetto positivo è emerso per i "bassi sincronizzatori". Questo risultato ci porta a riflettere ancora una volta sulla variabilità individuale all'interno della medesima popolazione clinica; infatti, nonostante tutti e sette i bambini presentino diagnosi di DE, le loro abilità ritmiche non sono le medesime e questa differenza impatta anche sull'efficacia del priming ritmico.

Inoltre, il nostro dato è in linea con lo studio di Mares et al., (2023) dove viene dimostrato un miglioramento delle capacità di sincronizzazione uditivo-motorie mediante priming ritmico passivo solo nel gruppo di "bassi sincronizzatori".

Queste evidenze sembrano sostenere che l'uso del ritmo possa essere particolarmente benefico per gli individui con deficit di timing motorio interno ma con alcune capacità cognitive intatte (Schaefer, 2014) e suggeriscono che l'efficacia della stimolazione ritmica varia a seconda dei deficit neurali e comportamentali specifici sollevando l'importante questione di personalizzare gli interventi.

Il nostro studio partendo dal quadro teorico proposto da Goswami (2011, TSF) che mette in luce un deficit temporale causato da alterazioni nel trascinarsi delle oscillazioni neurali in soggetti con DE, dimostra, in accordo con Pagliarini et al., (2015), che il deficit di timing ha un impatto significativo anche sulle abilità di scrittura manuale valutate in termini di rispetto del principio ritmico dell'isocronia. Il nostro modello predice infatti che i bambini con minori abilità di sincronizzazione sensorimotoria riportano un maggiore aumento di durata del tratto all'aumentare della lunghezza del movimento rispetto ai buoni sincronizzatori. In questo caso non abbiamo trovato alcun effetto del priming che può dipendere dal fatto che una stimolazione ritmica limitata nel tempo difficilmente riesce a modificare un meccanismo (isocronia) consolidato già in età prescolare prima dell'acquisizione della scrittura.

Limiti

Prima di concludere, riteniamo che debbano essere formulate alcune osservazioni critiche sui limiti di questo studio. In primo luogo, la ricerca è stata condotta su un piccolo campione di bambini con DE con e senza Disgrafia che non ci consente di generalizzare le nostre osservazioni alla popolazione generale. Sono necessari studi di replica e un numero maggiore di partecipanti per condurre un'analisi più sofisticata.

Un secondo limite riguarda il disegno sperimentale, in particolare, la mancata possibilità di testare un gruppo di controllo ad hoc non ci ha permesso di valutare differenze dell'effetto del suono sulle abilità grafo-motorie nelle diverse popolazioni che ci consentirebbe di capire se i benefici del suono ritmico sono generalizzabili alla popolazione non clinica oppure solo a popolazioni con deficit di timing. Inoltre, non abbiamo indagato l'eventuale esperienza musicale dei bambini che sappiamo avere un impatto generale sulle abilità sensori-motorie.

Infine, un ultimo limite che vogliamo sottolineare riguarda le caratteristiche strutturali dei dispositivi digitali utilizzati per l'esecuzione dei compiti che in alcuni casi hanno rappresentato un fattore di difficoltà nell'esecuzione del compito di prescrittura. I bambini hanno infatti lamentato le dimensioni e il peso maggiore della penna digitale rispetto alle penne comunemente usate. Inoltre, la superficie scivolosa del vetro del touchscreen di un tablet ha un attrito inferiore rispetto alla carta e quindi fornisce meno feedback sensoriale a chi scrive (Guilbert et al., 2019).

Prospettive future

Per quanto riguarda le prospettive future, data la carenza di studi a riguardo, riteniamo fondamentale indagare in maniera sistematica e controllata la relazione tra abilità ritmiche e grafomotricità in età evolutiva.

Per meglio comprendere il ruolo delle abilità ritmiche occorre però chiarire la loro multidimensionalità. La letteratura recente, infatti, date le dissociazioni osservate per le prestazioni in diversi tipi di compiti ritmici, sottolinea la natura multidimensionale di tali abilità e la presenza di differenti meccanismi neurali sottostanti (Fiveash et al., 2022). Approfondire questi aspetti consentirà di comprendere meglio i deficit del ritmo, i loro correlati neurali sottostanti e il loro impatto su abilità cognitive di alto livello nelle popolazioni di pazienti.

Inoltre, poiché i segnali uditivi ritmici sono sempre più utilizzati nella riabilitazione motoria in popolazioni cliniche adulte (Schaefer, 2014) ma non in età evolutiva e data l'importanza che il dominio fisico-corporeo riveste nell'acquisizione del linguaggio, riteniamo necessario indagare i possibili effetti comportamentali e neurali di un trattamento ritmico prolungato sulle abilità motorie e grafo-motorie nei disturbi del neurosviluppo.

Oggi, le tecniche di diagnosi e intervento sui disturbi dell'apprendimento sono fortemente arretrate rispetto alle necessità reali della popolazione. Fare ricerca è essenziale e, per ottenere al più presto linee guida evidence-based per professionisti sanitari e insegnanti, è cruciale focalizzarsi su strumenti pratici, economici che sappiano dare una foto della reale complessità del fenomeno, comprendendone le dinamiche anziché schiacciandole. Secondo i dettami del Neurocostruttivismo, comprendere le abilità adattive è fondamentale tanto quanto comprendere le atipie per poter offrire strumenti di potenziamento che rispettano l'adattamento di tutti gli individui nello spettro delle Neurodiversità.

4.1 Conclusioni

In conclusione, la presente ricerca, attraverso un'indagine sul ruolo del ritmo e delle abilità sensorimotorie nella scrittura manuale nell'ambito della Dislessia Evolutiva (DE), sottolinea l'importanza di considerare tali processi come abilità "low-level" fondamentali nella traiettoria evolutiva del linguaggio.

Nel dettaglio abbiamo rilevato un'associazione tra difficoltà di sincronizzazione sensorimotoria e prestazioni inferiori nella scrittura manuale in relazione agli aspetti ritmici e abbiamo dimostrato che l'uso di un priming ritmico-musicale può migliorare le prestazioni grafo-motorie, in termini di velocità e pressione media di tratto nei bambini DE con peggiori abilità ritmiche. Questi risultati suggeriscono che il ritmo può essere un fattore importante nell'ottimizzazione del controllo motorio e nell'anticipazione del movimento.

La nostra ricerca mostra inoltre una notevole variabilità interindividuale nella popolazione clinica, che enfatizza l'importanza di considerare le differenze a livello neurale e comportamentale all'interno dello stesso gruppo di pazienti per personalizzare gli interventi secondo le esigenze specifiche di ciascuno.

Da un punto di vista pratico, i nostri risultati suggeriscono la necessità di sviluppare nuovi strumenti di valutazione più sensibili ed efficaci per rilevare i deficit di timing e di scrittura nella DE, superando le limitazioni dei tradizionali test carta e matita. L'utilizzo di strumenti digitali rappresenta un passo nella giusta direzione.

Infine, alla luce dei risultati ottenuti, riteniamo che gli interventi per i bambini con DE dovrebbero andare oltre la sola lettura e includere attività mirate a migliorare le abilità di scrittura manuale. L'utilizzo di attività basate sulla rima, sul ritmo e sulla musica può essere altamente benefico poiché contribuisce allo sviluppo delle competenze di timing e coordinazione sensorimotoria, con effetti positivi su tutte le componenti del linguaggio.

Bibliografia

Accardo A. P., Genna M., Borean M. (2013), Development, maturation and learning influence on handwriting kinematics. *Human Movement Science*, 32, 136-146. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2012.10.004>

Adornetti I. (2016), *Il linguaggio: origine ed evoluzione*. Carocci Editore, Roma.

Alcock K. J., Jukes M. C., Ngorosho D., Deus C. (2010). We don't have language at our house: Disentangling the relationship between phonological awareness, schooling, and literacy. *British Journal of Educational Psychology*, 80(1), 55–76

Altenmüller E, Marco-Pallares J, Münte TF, Schneider S. Neural reorganization underlies improvement in stroke-induced motor dysfunction by music-supported therapy. *Ann N Y Acad Sci*. 2009 Jul; 1169:395-405. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04580.x. PMID: 19673814.

Andreola, C., Mascheretti, S., Belotti, R., Ogliari, A., Marino, C., Battaglia, M., & Scaini, S. (2020). The heritability of reading and reading-related neurocognitive components: A multi-level meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 121. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.11.016>

APA, American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: DSM-V*, Washington, D.C., American Psychiatric Association; trad. it. *Manuale diagnostico e statistico dei disturbi mentali. DSM-5*, Milano, Cortina, 2014.

Arbib M. (2005), From monkey-like action recognition to human language: an evolutionary framework for neurolinguistics. *Behavioral and Brain Science*, 28, 105-167.

Arbib, M. A. (2012). *How the brain got language: The mirror system hypothesis*. Oxford University Press.

Assaneo M. F., Ripollés P., Orpella J., Lin W. M., de Diego-Balaguer R., Poeppel D. (2019). Spontaneous synchronization to speech reveals neural mechanisms facilitating language learning. *Nat. Neurosci.* 22 627–632. 10.1038/s41593-019-0353-z - DOI - PMC - PubMed

Association, A. P. et al. (2020). *The American Psychiatric Association practice guideline for the treatment of patients with schizophrenia*. American Psychiatric Pub.

Barone L. (2015), *Manuale di psicologia dello sviluppo*. Carocci Editore, Rom

Barrientos P. Handwriting development in Spanish children with and without learning disabilities: A graphonomic approach. *Journal of learning disabilities*. 2017;50(5):552-63. ^[L]_[SEP]

- Bégel, V., Di Loreto, I., Seilles, A., & Dalla Bella, S. (2017). Music Games: Potential Application and Considerations for Rhythmic Training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2017.00273>
- Ben-Pazi, H., Kukke, S., & Sanger, T. D. (2007). Poor Penmanship in Children Correlates with Abnormal Rhythmic Tapping: A Broad Functional Temporal Impairment. *Journal of Child Neurology*, 22(5), 543–549. <https://doi.org/10.1177/0883073807302610>
- Berninger V. W., Abbott R. D., Jones J. (2006), Early development of language by hand: composing, reading, listening, and speaking connection; three letter- writing modes; and fast mapping in spelling. *Developmental Neuropsychology*, 29:1, 61-92.
- Blason L., Borean M., Bravar L., Zoia S. (2004), Il corsivo dalla A alla Z: un metodo per insegnare i movimenti della scrittura. La teoria. Trento, Erikson
- Bonacina, S., Krizman, J., White-Schwoch, T., & Kraus, N. (2018). Clapping in time parallels literacy and calls upon overlapping neural mechanisms in early readers. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1423(1), 338–348. <https://doi.org/10.1111/nyas.13704>
- Brandt, A., Gebrian, M., and Slevc, L. R. (2012). Music and early language acquisition. *Frontiers in psychology*, 3:327.
- Braun Janzen, T., Koshimori, Y., Richard, N. M., & Thaut, M. H. (2022). Rhythm and Music-Based Interventions in Motor Rehabilitation: Current Evidence and Future Perspectives. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2021.789467>
- Calabrò RS, Naro A, Filoni S, Pullia M, Billeri L, Tomasello P, Portaro S, Di Lorenzo G, Tomaino C, Bramanti P. Walking to your right music: a randomized controlled trial on the novel use of treadmill plus music in Parkinson's disease. *J Neuroeng Rehabil*. 2019 Jun 7;16(1):68. doi: 10.1186/s12984-019-0533-9. PMID: 31174570; PMCID: PMC6555981.
- Cancer, A., Bonacina, S., Antonietti, A., Salandi, A., Molteni, M., & Lorusso, M.L. (2020). The effectiveness of interventions for developmental dyslexia: rhythmic reading training compared with hemisphere-specific stimulation and action video games. *Frontiers in Psychology*, 11.
- Cancer, A., Stievano, G., Pace, G., Colombo, A., & Antonietti, A. (2019). Cognitive processes underlying reading improvement during a rhythm-based intervention. A small-scale investigation of Italian children with dyslexia. *Children*, 6(8), 91.
- Capirci, O., Sabbadini, L., & Volterra, V. (1996). Capirci, O., Sabbadini, L., Volterra, V. (1996). Language Development in Williams Syndrome: A Case Study. *Cognitive Neuropsychology*, 13 (7), 1017-1039. *Cognitive Neuropsychology*, 13, 1017–1039. <https://doi.org/10.1080/026432996381764>

Capone, N. C., & McGregor, K. K. (2004). Gesture development: A review for clinical and research practices. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, 47(1), 173–186. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2004/015\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2004/015))

Chang, S.-E., Chow, H. M., Wieland, E. A., and McAuley, J. D. (2016). Relation between functional connectivity and rhythm discrimination in children who do and do not stutter. *NeuroImage: Clinical*, 12:442–450.

Conway, C. M., Pisoni, D. B., and Kronenberger, W. G. (2009). The importance of sound for cognitive sequencing abilities: The auditory scaffolding hypothesis. *Current directions in psychological science*, 18(5):275–279.

Corballis, M. (2002). *From Hand to Mouth: The Origins of Language*. Princeton, NJ: Princeton University Press.

Corballis, M. C. (2011). *The recursive mind: The origins of human language, thought, and civilization*. Princeton University Press.

Cornoldi (a cura di), *Difficoltà e disturbi dell'apprendimento*. (2007). Il Mulino, Bologna

Courson, M., Macoir, J., & Tremblay, P. (2017). Role of medial premotor areas in action language processing in relation to motor skills. *Cortex*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.08.002>

Cunningham, A. E., & Stanovich, K. E. (1990). Early spelling acquisition: Writing beats the computer. *Journal of Educational Psychology*, 82(1), 159–162. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.82.1.159>

Darwin, C. (1871). *The descent of man, and Selection in relation to sex*, Vol. 1. John Murray. <https://doi.org/10.1037/12293-000>

D'Ausilio A., Maffongelli L., Fadiga L. (2013), L'origine comune del linguaggio e azione. *Rivista Internazionale di Filosofia e Psicologia*, 4:2, 198-203. Doi: 10.4453/rifp.2013.0018

Di Brina C. e Rossini G. (a cura di) (2021), *BHK: Scala sintetica per la valutazione della scrittura in età evolutiva*, Trento, Erickson.

Di Vincenzo, F., & Manzi, G. (2012). L'origine darwiniana del linguaggio. *MicroMega*, 1/2012, 147–167.

Ellis, A. (1988). *Modelling the Writing Process*. <https://doi.org/10.4324/9781315637426-10>

Eilers, R. E., Oller, D. K., Levine, S., Basinger, D., Lynch, M. P., & Urbano, R. (1993). The role of prematurity and socioeconomic status in the onset of canonical babbling in infants. *Infant Behavior and Development*, 16(3), 297–315. [https://doi.org/10.1016/0163-6383\(93\)80037-9](https://doi.org/10.1016/0163-6383(93)80037-9)

Ferreiro, E.; Teberosky, A. 1982. Literacy before schooling. Exeter, NH; London, Heinemann. (Original in Spanish: Los sistemas de escritura en el desarrollo del niño. México, Siglo XXI Editores, 1979.).

Fiveash, A., Bedoin, N., Gordon, R. L., and Tillmann, B. (2021). Processing rhythm in speech and music: Shared mechanisms and implications for developmental speech and language disorders. *Neuropsychology*, 35(8):771.

Fitch, W. T. (2014). Toward a computational framework for cognitive biology: Unifying approaches from cognitive neuroscience and comparative cognition. *Physics of life reviews*, 11(3):329–364.

Flaugnacco, E., Luisa, L., Terribili, C., Montico, M., Zoia, S., & Schön, D. (2015). Music Training Increases Phonological Awareness and Reading Skills in Developmental Dyslexia: A Randomized Control Trial. *PLoS ONE*, 10.

Frey, A., Lessard, A., Carchon, I., Provasi, J., & Pulido, L. (2022). Rhythmic training, literacy, and graphomotor skills in kindergarteners. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2022.959534>

Frith, U. (1986). A developmental framework for developmental dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 36, 69–81. <https://doi.org/10.1007/BF02648022>

Galli, M., Vimercati, S. L., Stella, G., Caiazzo, G., Norveti, F., Onnis, F., Rigoldi, C., & Albertini, G. (2011). A new approach for the quantitative evaluation of drawings in children with learning disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 32(3), 1004–1010. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.01.051>

Gimenez P., Bugescu N., Black J. M., Hancock R., Pugh K., Nagamine M., Kutner E., Mazaika P., Hendren R., McCandliss B. D., Hoeft F. (2014), Neuroimaging correlates of handwriting quality as children learn to read and write. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8:155, 1-15.

Giraud, A.-L. and Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: emerging computational principles and operations. *Nature neuroscience*, 15(4):511–517.

Goswami, U., Fosker, T., Huss, M., Mead, N., & Szucs, D. (2011). Rise Time and Formant Transition Duration in the Discrimination of Speech Sounds: The Ba-Wa Distinction in Developmental Dyslexia. *Developmental Science*, 14(1), 34–43.

Granier-Deferre, C., Ribeiro, A., Jacquet, A.-Y., and Bassereau, S. (2011). Near-term fetuses process temporal features of speech. *Developmental science*, 14(2):336–352.

- Guan, C. Q., Smolen, E. R., Meng, W., & Booth, J. R. (2021). Effect of Handwriting on Visual Word Recognition in Chinese Bilingual Children and Adults. *Frontiers in Psychology*, 12, 628160. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.628160>
- Guilbert J, Alamargot D, Morin MF. Handwriting on a tablet screen: Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Hum Mov Sci*. 2019 Jun;65: S0167-9457(18)30093-9. doi: 10.1016/j.humov.2018.09.001. Epub 2018 Sep 12. PMID: 30219272.
- Haggard, P., Jenner, J., & Wing, A. (1994). Coordination of aimed movements in a case of unilateral cerebellar damage. *Neuropsychologia*, 32(7), 827–846. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)90021-3](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)90021-3)
- Hollerbach, J. M. (1981). An oscillation theory of handwriting. *Biological Cybernetics*, 39(2), 139–156. <https://doi.org/10.1007/BF00336740>
- Iversen J. R., Balasubramaniam R. (2016). Synchronization and temporal processing. *Curr. Opin. Behav. Sci.* 8, 175–180. 10.1016/j.cobeha.2016.02.027
- Iverson J. M. (2010), Developing language in a developing body: the relationship between motor development and language development. *F. Child Lang*, 37, 229- 261. Doi: 10.1017/S0305000909990432
- Jones, M. R. (2018). *Time will tell: A theory of dynamic attending*. Oxford University Press.
- James, K. H., & Engelhardt, L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2012.08.001>
- Karmiloff-Smith, A. (2013). Challenging the use of adult neuropsychological models for explaining neurodevelopmental disorders: Developed versus developing brains. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (2006), 66(1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.744424>
- Keitel, A., Gross, J., & Kayser, C. (2018). Perceptually relevant speech tracking in auditory and motor cortex reflects distinct linguistic features. *PLOS Biology*, 16(3), e2004473. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004473>
- Khalid P.I., Yunus J., Adnan R., Extraction of dynamic features from hand drawn data for the identification of children with handwriting difficulty *Research in Developmental Disabilities*, 31 (1) (2010), pp. 256-262, 10.1016/j.ridd.2009.09.009
- Kirschner, M Tomasello, Joint drumming: Social context facilitates synchronization in preschool children. *J Exp Child Psychol* 102, 299–314 (2009).

Kohler E., Keysers C., Umiltà M. A., Fogassi L., Gallese V., Rizzolatti G. (2002), Hearing sounds, understanding actions: action representation in mirror neurons. *Science*, 297,846-848. Doi: 10.1126/science.1070311

Kotz, S. A., Ravignani, A., and Fitch, W. T. (2018). The evolution of rhythm processing. *Trends in cognitive sciences*, 22(10):896–910.

Ladányi, E., Persici, V., Fiveash, A., Tillmann, B., and Gordon, R. L. (2020). Is atypical rhythm a risk factor for developmental speech and language disorders? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 11(5): e1528.

Lange EB, Pieczykolan A, Trukenbrod HA, Huestegge L. The rhythm of cognition - Effects of an auditory beat on oculomotor control in reading and sequential scanning. *J Eye Mov Res*. 2018 Aug 20;11(2):10.16910/jemr.11.2.9. doi: 10.16910/jemr.11.2.9. PMID: 33828692; PMCID: PMC7886406.

Langus, A., Mehler, J., and Nespors, M. (2017). Rhythm in language acquisition. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 81:158–166.

Lashley, K. S. et al. (1951). *The problem of serial order in behavior*, volume 21. Bobbs-Merrill Oxford.

Lecanuet, J.-P. and Schaal, B. (2002). Sensory performances in the human foetus: A brief summary of research. *Intellectica*, 34(1):29–56.

Lin Q., Luo J., Wu Z., Shen F., Sun Z. (2015), Characterization of fine motor development: Dynamic analysis of children's drawing movements. *Human Movement Science*, 40, 163-175. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.humov.2014.12.010>

Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.-C., & Velay, J.-L. (2006). Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge: A comparison between handwriting and typing. *Human Movement Science*, 25(4), 646–656. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.07.007>

Longcamp, M., Velay, J., Berninger, V. W., & Richards, T. (2016). Neuroanatomy of Handwriting and Related Reading and Writing Skills in Adults and Children with and without Learning Disabilities: French American Connections. *Pratiques. Linguistique, Littérature, Didactique*, 171–172, Article 171–172. <https://doi.org/10.4000/pratiques.3175>

Luo L, Lu L. Studying rhythm processing in speech through the lens of auditory-motor synchronization. *Front Neurosci*. 2023 Mar 2; 17:1146298. doi: 10.3389/fnins.2023.1146298. PMID: 36937684; PMCID: PMC10017839.

Manto, M., Bower, J. M., Conforto, A. B., Delgado-García, J. M., da Guarda, S. N. F., Gerwig, M., Habas, C., Hagura, N., Ivry, R. B., Mariën, P., Molinari, M., Naito, E., Nowak, D. A., Oulad

Ben Taib, N., Pelisson, D., Tesche, C. D., Tilikete, C., & Timmann, D. (2012). Consensus paper: Roles of the cerebellum in motor control--the diversity of ideas on cerebellar involvement in movement. *Cerebellum* (London, England), 11(2), 457–487. <https://doi.org/10.1007/s12311-011-0331-9>

Marini A. (2018), *Manuale di neurolinguistica*. Carocci editore, Roma.

Martens, M. A., Reutens, D. C., and Wilson, S. J. (2010). Auditory cortical volumes and musical ability in williams syndrome. *Neuropsychologia*, 48(9):2602–2609.

McAuley, J. D. (2010). Tempo and rhythm. In *Music perception*, pages 165–199. Springer.

Merchant, H. and Honing, H. (2014). Are non-human primates capable of rhythmic entrainment? evidence for the gradual audiomotor evolution hypothesis. *Frontiers in neuroscience*, page 274.

Merker, B. H., Madison, G. S., and Eckerdal, P. (2009). On the role and origin of isochrony in human rhythmic entrainment. *Cortex*, 45(1):4–17.

Mithen, S. (2005). *The singing Neanderthals: The origins of music, language, mind, and body*.

Morillon, B. and Baillet, S. (2017). Motor origin of temporal predictions in auditory attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(42): E8913–E8921.

Overy, K. (2003). Dyslexia and music: From timing deficits to musical intervention. *Annals of the New York academy of sciences*, 999(1):497–505.

Ozernov-Palchik, O. and Patel, A. D. (2018). Musical rhythm and reading development: does beat processing matter? *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1423(1):166–175.

Pagliarini, E., Guasti, M. T., Toneatto, C., Granocchio, E., Riva, F., Sarti, D., Molteni, B., & Stucchi, N. (2015). Dyslexic children fail to comply with the rhythmic constraints of handwriting. *Human Movement Science*, 42, 161–182. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.04.012>

Pagliarini, E., Scocchia, L., Vernice, M., Zoppello, M., Balottin, U., Bouamama, S., Guasti, M. T., and Stucchi, N. (2017). Children's first handwriting productions show a rhythmic structure. *Scientific reports*, 7(1):1–10.

Palmis, S., Danna, J., Velay, J.-L., & Longcamp, M. (2017). Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cognitive Neuropsychology*, 34(3–4), 187–204. <https://doi.org/10.1080/02643294.2017.1367654>

Patel, A. D. (2006). Musical rhythm, linguistic rhythm, and human evolution. *Music Perception*, 24(1):99–104.

Patel, A. D. (2011). Why would musical training benefit the neural encoding of speech? the opera hypothesis. *Frontiers in psychology*, 2:142.

Patel, A. D. (2021). Vocal learning as a preadaptation for the evolution of human beat perception and synchronization. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 376(1835):20200326.

Persici, V., Stucchi, N., Arosio, F. (2019). Predicting the future in rhythm and language: The anticipation abilities of a group of Italian speaking children. In P. Guijarro-Fuentes & C. Suárez-Gómez (Eds.), *Proceedings of GALA 2017: Language Acquisition and Development* (pp. 451–468). Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholar Publishers.

Pewsey, A., Neuhäuser, M., & Ruxton, G. D. (2013). *Circular statistics in R*. OUP Oxford

Phillips-Silver J, Trainor LJ. Feeling the beat: movement influences infant rhythm perception. *Science*. 2005 Jun 3;308(5727):1430. doi: 10.1126/science.1110922. PMID: 15933193.

Ploog, D. (2002) *Is the Neural Basis of Vocalisation Different in Non-Human Primates and Homo Sapiens?* Oxford University Press, Oxford.

Provasi, J., Anderson, D. I., and Barbu-Roth, M. (2014). Rhythm perception, production, and synchronization during the perinatal period. *Frontiers in Psychology*, 5:1048.

Rathcke, T., Lin, C.-Y., Falk, S., & Dalla Bella, S. (2021). Tapping into linguistic rhythm. *Laboratory Phonology: Journal of the Association for Laboratory Phonology*, 12, 11. <https://doi.org/10.5334/labphon.248>

Ravignani, A. and Madison, G. (2017). The paradox of isochrony in the evolution of human rhythm. *Frontiers in psychology*, 8:1820.

Rizzolatti G. & Arbib M. (1998), Language within our grasp. *Trends in Neuroscience*, 21,188-194. Doi: S0166-2236(98)01260-0

Rizzolatti G. & Craighero L. (2007), Language and mirror neurons. *The Oxford Handbook of Psycholinguistics*, 47, 771-785.

Doi: 10.1093/OXFORDHB/9780198568971.013.0047

Rocha, S., Attaheri, A., Choidealbha, Á. N., Brusini, P., Flanagan, S. A., Mead, N., Boutris, P., Gibbon, S., Olawole-Scott, H., Grey, C., et al. (2021). Infant sensorimotor synchronisation to speech and non-speech rhythms: A longitudinal study.

Rosenbaum, D. A. (2005). The Cinderella of Psychology: The Neglect of Motor Control in the Science of Mental Life and Behavior. *American Psychologist*, 60(4), 308–317. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.60.4.308>

Rosenblum, S., Weiss, P., & Parush, S. (2003). Product and Process Evaluation of Handwriting Difficulties. *Educational Psychology Review*, 15, 41–81. <https://doi.org/10.1023/A:1021371425220>

Russo, S., Valenza, E., & Rodà, A. (s.d.). *Cross-domain and cross-sensory effects of rhythm on language development*. (Tesi di dottorato). Padova: Università degli studi di Padova. 2023

Schaefer, R. S. (2014). Auditory rhythmic cueing in movement rehabilitation: Findings and possible mechanisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1658). <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0402>

Seyll, L., & Content, A. (2022). Letter-Like Shape Recognition in Preschool Children: Does Graphomotor Knowledge Contribute? *Frontiers in Psychology*, 12. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.726454>

Sgolastra Arianna. *La relazione tra il sistema motorio e il sistema linguistico: l'analisi della scrittura manuale come strumento d'indagine*. (Tesi di laurea Magistrale). Padova: : Università degli studi di Padova. 2023

Stephan, M. A., Brown, R., Lega, C., and Penhune, V. (2016). Melodic priming of motor sequence performance: The role of the dorsal premotor cortex. *Frontiers in Neuroscience*, 10:210.

Stein, J. (2019). The current status of the magnocellular theory of developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 130, 66–77

Stein, J. (2023). Theories about Developmental Dyslexia. *Brain Sciences*, 13(2), 208. <https://doi.org/10.3390/brainsci13020208>

Steinbrink, C., Knigge, J., Mannhaupt, G., Sallat, S., & Werkle, A. (2019). Are Temporal and Tonal Musical Skills Related to Phonological Awareness and Literacy Skills? – Evidence From Two Cross-Sectional Studies with Children from Different Age Groups. *Frontiers in Psychology*, 10.

Struhsaker, T. T. (1967). Social structure among vervet monkeys (*Cercopithecus aethiops*). *Behaviour*, 29(2-4), 83–121. <https://doi.org/10.1163/156853967X00073>

Strukelj, A., Niehorster, D. C. (2018). One page of text: Eye movements during regular and thorough reading, skimming, and spell checking. *Journal of Eye Movement Research*, 11(1).

Styns, F., van Noorden, L., Moelants, D., & Leman, M. (2007). Walking on music. *Human Movement Science*, 26(5), 769–785. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2007.07.007>

Sun, C., Meng, X., Du, B., Zhang, Y., Liu, L., Dong, Q., Georgiou, G. K., and Nan, Y. (2022). Behavioral and neural rhythm sensitivities predict phonological awareness and word reading development in chinese. *Brain and Language*, 230:105126.

Thaut MH, Rice RR, Braun Janzen T, Hurt-Thaut CP, McIntosh GC. Rhythmic auditory stimulation for reduction of falls in Parkinson's disease: a randomized controlled study. *Clin Rehabil.* 2019 Jan;33(1):34-43. doi: 10.1177/0269215518788615. Epub 2018 Jul 23. PMID: 30033755.

Thomson, J. M. and Goswami, U. (2008). Rhythmic processing in children with developmental dyslexia: auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology-Paris*, 102(1-3):120–129.

Tong Y, Forreider B, Sun X, Geng X, Zhang W, Du H, Zhang T, Ding Y. Music-supported therapy (MST) in improving post-stroke patients' upper-limb motor function: a randomised controlled pilot study. *Neurol Res.* 2015 May;37(5):434-40. doi: 10.1179/1743132815Y.0000000034. Epub 2015 Apr 27. PMID: 25916420.

Travers, B. G., Powell, P. S., Klinger, L. G., & Klinger, M. R. (2013). Motor difficulties in autism spectrum disorder: Linking symptom severity and postural stability. *Journal of Autism and Developmental Disorders*, 43(7), 1568–1583. <https://doi.org/10.1007/s10803-012-1702-x>

Tressoldi, P. E., & Vio, C. (2012). *Il trattamento dei disturbi specifici dell'apprendimento scolastico*. Edizioni Erickson.

Trevarthen, C. (1979). Communication and cooperation in early infancy: A description of primary intersubjectivity. In M. Bullowa (Ed.), *Before speech: The beginning of human communication* (pp. 321-347). Cambridge: Cambridge University Press.

Vaivre-Douret L., Lopez C., Dutruel A., Vaivre S. (2021), Phenotyping features in the genesis of pre-scriptural gestures in children to assess handwriting developmental levels. *Scientific Report*, 11:7311. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79315-w>

Valenza E. & Turati C. (2019), *Promuovere lo sviluppo della mente*. Il Mulino, Bologna.

Valenza et al. (2019), Individual differences in postural stability and in motor clumsiness and their co-occurrence with the linguistic domain. Unpublished manuscript.

van Galen GP, Portier SJ, Smits-Engelsman BC, Schomaker LR. Neuromotor noise and poor handwriting in children. *Acta Psychol (Amst)*. 1993 Mar;82(1-3):161-78. doi: 10.1016/0001-6918(93)90010-o. PMID: 8475764

Van Vugt FT, Ritter J, Rollnik JD, Altenmüller E. Music-supported motor training after stroke reveals no superiority of synchronization in group therapy. *Front Hum Neurosci.* 2014 May 20; 8:315. doi: 10.3389/fnhum.2014.00315. PMID: 24904358; PMCID: PMC4033001.

Véron-Delor L, Pinto S, Eusebio A, Azulay JP, Witjas T, Velay JL, Danna J. Musical sonification improves motor control in Parkinson's disease: a proof of concept with handwriting. *Ann N Y*

Acad Sci. 2020 Apr;1465(1):132-145. doi: 10.1111/nyas.14252. Epub 2019 Oct 10. PMID: 31599463.

Vicari, M. C. Caselli (a cura di) (2017), *Neuropsicologia dell'età evolutiva. Prospettive teoriche e cliniche*. Il Mulino, Bologna.

Vinci-Booher, S., & James, K. H. (2021). Protracted Neural Development of Dorsal Motor Systems During Handwriting and the Relation to Early Literacy Skills. *Frontiers in Psychology*, 12, 750559. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.750559>

Watkins, K., Cervesato, I., Pfenning, F., & Walker, D. (2003, April). A concurrent logical framework: The propositional fragment. In *International Workshop on Types for Proofs and Programs* (pp. 355-377). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

W.H.O. (World Health Organization) (1993), "The ICD-10 classification of mental and behavioural disorders: diagnostic criteria for research", Ginevra.

Wittwer JE, Webster KE, Hill K. 2013. Effect of rhythmic auditory cueing on gait in people with Alzheimer disease. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 94, 718–724. (10.1016/j.apmr.2012.11.009)

Wolff, P. H. (2002). Timing precision and rhythm in developmental dyslexia. *Reading and Writing*, 15(1):179–206.

Woodruff Carr K, White-Schwoch T, Tierney AT, Strait DL, Kraus N. Beat synchronization predicts neural speech encoding and reading readiness in preschoolers. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2014 Oct 7;111(40):14559-64. doi: 10.1073/pnas.1406219111. Epub 2014 Sep 22. PMID: 25246562; PMCID: PMC4210020.

Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading Acquisition, Developmental Dyslexia, and Skilled Reading Across Languages: A Psycholinguistic Grain Size Theory. *Psychological Bulletin*, 131(1), 3–29. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.1.3>

Zimmerman, E. and Barlow, S. M. (2012). The effects of vestibular stimulation rate and magnitude of acceleration on central pattern generation for chest wall kinematics in preterm infants. *Journal of Perinatology*, 32(8):614–620.

Zuguang Gu, Lei Gu, Roland Eils, Matthias Schlesner, Benedikt Brors, circlize implements and enhances circular visualization in, *Bioinformatics*, Volume 30, Issue 19, October 2014, Pages 2811–2812, <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu393>