



HAL
open science

Un esempio di costruzione di UDA dalla prospettiva della neuropedagogia

Giuseppe Iurato

► **To cite this version:**

Giuseppe Iurato. Un esempio di costruzione di UDA dalla prospettiva della neuropedagogia. 2023.
hal-04177908v2

HAL Id: hal-04177908

<https://hal.science/hal-04177908v2>

Preprint submitted on 21 Aug 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un esempio di costruzione di UDA dalla prospettiva della neuropedagogia

Giuseppe Iurato

Ministero dell'Istruzione, IT

Sunto. Si presenta un esempio concreto di costruzione di una unità didattica di apprendimento (UDA) secondo un punto di vista neuropedagogico.

1. Introduzione

Questa relazione è un ampliamento, perlopiù bibliografico, di una precedente redatta pochi mesi fa, presentata durante il colloquio per il conseguimento del ruolo di insegnante nelle scuole pubbliche superiori (di II grado), consistente della discussione di una *unità didattica di apprendimento* (UDA) svolta dal candidato (G.I.) durante l'anno di prova (a.s. 2022-23) per l'immissione in ruolo. Stante l'ineludibilità di una prospettiva interdisciplinare in pedagogia (Bertolini, 2005), tale UDA è stata pensata e progettata all'interno di quel recente capitolo della psicopedagogia detto *neuropedagogia*, il cui compito è ben chiarito e delineato in (Oliverio, 2017). Dopo aver esposto le dovute premesse di base di neuropsicologia e di neuroscienze cognitive, seguirà la loro applicazione didattica alla effettiva costruzione di una possibile UDA.

2. Neuropedagogia e didattica: un possibile esempio di cooperazione

L'impianto teorico e l'impostazione strutturale di una qualsiasi *unità didattica di apprendimento* (UDA) dovrebbero sempre configurarsi entro l'ambito della *psicopedagogia*, intesa questa come specificazione scientifica della pedagogia (Bertolini 1996, p. 469). La prima parte di questa sezione espone quindi sommariamente quei principi delle scienze psicologiche sottostanti alla successiva esemplificazione di pianificazione di una UDA.

2.1. Principi base di neuropsicologia e neuroscienze cognitive

Stante l'inseparabilità del binomio *insegnamento-apprendimento*¹, le varie metodologie didattiche di insegnamento debbono essere funzionali all'*apprendimento cognitivo*. Quest'ultimo, come processo psichico, coinvolge molte facoltà quali la *percezione*, l'*immaginazione*, l'*attenzione*, la *memoria*, per citare solo alcune delle più importanti (Bertolini 1996, p. 26). Proprio quest'ultima facoltà psichica è stata quella presa in maggiore considerazione rispetto alle altre, per le ragioni che seguono².

Recenti ricerche di neuroscienze cognitive hanno rilevato delle correlazioni funzionali positive fra il network neurale visuo-spaziale e quello fonologico per i processi mentali dell'*aritmetica*, mentre, per quelli dell'*algebra*, sono state rilevate correlazioni funzionali positive fra il *network semantico* e quello *visuo-spaziale*. Altre evidenze sperimentali mostrano che sia i processi aritmetici sia quelli algebrici sono associati alla medesima area cerebrale, quella del *lobo parietale*, perlopiù deputata alle abilità visuo-spaziali; tuttavia i secondi attivano, a differenza dei primi, anche il network semantico, presumendo, quindi, una certa dissociazione neurofunzionale fra questi due processi. In ogni caso, resta appurato come entrambi risiedano considerevolmente nel lobo parietale (Cheng et al., 2022). Altri studi di neuroscienze cognitive hanno inoltre assodato che i processi mentali relativi a matematica, fisica e chimica sono elicitati, ai medesimi livelli di attivazione neurale, nello stesso network, quello visuo-spaziale, in compartecipazione a quello semantico. Tutto ciò suggerisce che questi due network neurali sono entrambi cruciali per l'elicitazione dei processi mentali concernenti sia la matematica che le scienze naturali; in particolare, Wang e collaboratori (2022)

¹ Una procedura di insegnamento-apprendimento, adottata per conseguire obiettivi educativi, costituisce l'oggetto della metodologia didattica (Bertolini 1996, p. 355).

² Le considerazioni che seguono sono tratte dalle scienze psicologiche. Infatti, si assume valido il principio secondo cui pedagogia e psicologia sono indissolubilmente legate, in quanto «facce di una medesima medaglia» (Trisciuzzi & Billi 2004, p. 9; Trisciuzzi et al. 2004, p. 3).

puntualizzano sul ruolo fondamentale svolto dal *network visuo-spaziale*, dove vengono elicitati i processi astratti, tipici della matematica (ancor più delle scienze naturali), nonché osservano come, da un punto di vista pedagogico, siano proficui gli opportuni abbinamenti interdisciplinari fra matematica e scienze i cui processi mentali, attivando – come sperimentalmente appurato – soprattutto i network neurali visuo-spaziale e semantico in modalità pressoché sincronica, supportano la *dual coding theory* (DCT) (o *teoria della doppia codifica*, o anche *teoria del doppio codice*) di Allan Paivio (2014), che prevede, nello spiegare i processi cognitivi umani, una cooperazione bidirezionale fra i due codici verbale (linguistico) e non verbale in qualsiasi processo di pensiero³: invero, i sistemi mentali verbali riguardano il network semantico, mentre i sistemi mentali non verbali concernono il network visuo-spaziale. Dunque, i risultati sperimentali riportati da (Wang et al., 2022) confermano la DCT, in quanto i vari processi mentali della matematica e delle scienze naturali sono appunto il risultato di una rappresentazione duale composita di codici verbali (network semantico) e non verbali (network visuo-spaziale).

Da qui, l'importanza dei network visuo-spaziale e semantico per i processi mentali della matematica e delle scienze naturali; in particolare, quello visuo-spaziale ha un ruolo determinante per i processi di astrazione. Allan Paivio (1986) ha sperimentalmente dimostrato come le immagini mentali siano in grado di facilitare le prestazioni della memoria, presentando concreti vantaggi rispetto a rappresentazioni solo verbali dei ricordi (Bara 1990, Cap. 5). D'altronde, il meccanismo fondamentale della DCT, cioè l'interazione cooperativa bidirezionale fra i due codici verbale e non verbale, è stato annoverato fra i possibili meccanismi funzionali relativi ai trasferimenti di contenuti fra memoria di lavoro e memoria a lungo termine (Bara 1990, Cap. 5; Ericsson & Kintsch, 1995; Paivio, 2014) e in generale fra processi di base di memorizzazione e richiamo (Mecacci 1992, p. 305). La *memoria* è una delle facoltà psichiche fondamentali, non solo per l'apprendimento – che, essendo un processo di acquisizione di nuove informazioni, è strettamente correlato alla memoria in quanto quest'ultima viene creata appunto quando si apprende (Gazzaniga et al. 2015, p. 392; Marini 2016, p. 114; Pinel & Barnes 2018, pp. 272-73) – ma anche per il ragionamento (Miller 1994, pp. 259-60). Attualmente, si ritiene che la memoria sia assimilabile ad un sistema modulare multicomponentiale⁴, anzitutto suddivisibile in due grandi sottocategorie: *memoria a breve termine* (MBT) e *memoria a lungo termine* (MLT). La prima contiene un notevole sottosistema⁵, detto *memoria di lavoro* (MdL), il luogo dove si realizza la maggior parte della cognizione⁶ (Houdé et al. 2000, p. 311; Kandel 2012, p. 456) deliberativa in cui si formano nuove rappresentazioni per pensare, ragionare, pianificare e decidere (LeDoux 2020, Cap. 46), dove vengono transitoriamente mantenute e manipolate informazioni, che non sono più direttamente accessibili ai sensi, per il tempo necessario a svolgere le attività cognitive richieste su di esse, nonché a recuperare altre informazioni disperse ma inerenti al compito da svolgere (Hoidé et al. 2000, p. 311): quando si pensa attivamente, si vuol recuperare un'informazione oppure si deve risolvere un problema, è proprio la memoria di lavoro (MdL) che viene prevalentemente utilizzata (Kandel 2012, p. 362; Taylor 2007, Cap. 1). Se si ricorre alla nozione di *schemi* (nel senso di J. Piaget) quali elementi costitutivi della cognizione, essi permettono di concettualizzare nuove informazioni sulla base dell'esperienza passata, nonché di immagazzinare e ricordarle nel modo più efficace; le funzioni di controllo esecutivo (o semplicemente *funzioni esecutive*; vedi seguito) della MdL svolgono un ruolo chiave nei processi di categorizzazione, formazione, uso, aggiornamento (per *assimilazione e accomodamento*) e poi memorizzazione (in MLT) degli schemi, così come nel successivo recupero delle informazioni utili in situazioni rilevanti per il futuro. Più di altri animali, gli esseri umani hanno la capacità di usare la MdL per integrare le varie informazioni pervenute attraverso diverse modalità sensoriali, per pensare concettualmente e schematicamente anziché solo percettivamente, nonché per guardare al futuro (LeDoux 2020, Cap. 46). Dunque, la MdL è ciò che rende possibile il monitoraggio interno degli eventi che hanno luogo nell'ambiente esterno (compresi i propri comportamenti) nonché la raccolta di informazioni interne provenienti dalla MLT (inclusi schemi e modelli), su sé stessi e sul mondo, per generare un'interpretazione, una narrazione su quegli eventi e quelle azioni; ed i circuiti prefrontali (vedi seguito) della MdL sono stati infatti sperimentalmente individuati come quelli principalmente coinvolti nella produzione di narrazioni, schemi,

3 Un approccio alquanto simile a quello di A. Paivio, si può rintracciare sia nel *metodo della doppia stimolazione* di L.S. Sakharov, della scuola vygotskijana (Miller 1994, Cap. 7, § 3.2) che nella *teoria del doppio codice* di Wilma Bucci (Thomä & Kächele 1990-93, Vol. I, pp. 210-11; Vol. II, p. 201).

4 Si parla pure di sistemi di memoria multipli e dissociabili (Berardi & Pizzorusso 2006, Cap. 9).

5 Molti autori ormai fanno coincidere memoria a breve termine (MBT) e memoria di lavoro (MdL), altri invece li considerano due sistemi distinti, considerando la seconda un sistema che, oltre a trattenere (passivamente, come nella MBT) quantità di informazioni per breve tempo, realizza, su queste, compiti cognitivi finalizzati a raggiungere un obiettivo a breve termine (Fabbro 2016, p. 359; Marini 2016, p. 119).

6 Le teorie neostrutturaliste (o neopiagetiane) dello sviluppo (sia ontogenetico che filogenetico) cognitivo avanzano l'ipotesi di un parallelo sviluppo delle capacità funzionali della MdL (Houdé et al. 2000, p. 311; LeDoux 2020, Cap. 50); ciò è coerente con lo sviluppo (sia ontogenetico che filogenetico) della corteccia prefrontale nell'uomo, base neuro-anatomica della MdL. Juan Pascual-Leone quantifica lo sviluppo cognitivo attraverso una variabile legata alla potenza dell'operatore di attenzione mentale (EC, quindi funzioni esecutive, legate alla corteccia prefrontale) che garantisce, in MdL, l'attivazione degli schemi pertinenti al momento della risoluzione di un dato problema cognitivo, quantificazione che poi determina gerarchicamente gli altri sottostadi dello sviluppo cognitivo (Houdé et al. 2000, p. 479). Le risorse attentive infatti si presume che aumentino nel corso dello sviluppo, raggiungendo un massimo nell'età adulta, per poi gradualmente diminuire nell'età avanzata, via via che procede l'invecchiamento (Legrenzi & Umiltà 2016, p. 77).

modelli mentali, rappresentazioni del sé, confabulazioni e della coscienza medesima (LeDoux 2020, Cap. 52).

A sua volta, la MdL si suppone formata da quattro sottocomponenti autonome (secondo il *modello di A. Baddeley e G. Hitch*), due delle quali (i.e., LF e TVS; vedi seguito) corrispondono alle modalità di rappresentazione dell'informazione (i.e., fonologico-articolatoria e visuo-spaziale): un sistema attentivo di controllo (sovente detto anche *sistema attentivo superiore-SAS*⁷), detto *esecutivo centrale* (EC), da alcuni psicologi⁸ ritenuto essere il centro della coscienza⁹, deputato all'attivazione e alla focalizzazione dell'attenzione (*attenzione esecutiva*), alla pianificazione, alla supervisione e al controllo¹⁰ strategico, alla generazione e al mantenimento delle intenzioni e finalità, al monitoraggio dell'ambiente fisico e sociale, alla inibizione di informazioni automatiche, abituali o inappropriate (Nicoletti et al. 2008, Parte I), detta specificatamente *inibizione della risposta dominante*¹¹ (Berardi & Pizzorusso 2006, Cap. 9); l'EC poi coordina altre due componenti (della MdL), ovverosia il *loop fonologico o articolatorio*¹² (LF), che mantiene, manipola ed elabora l'informazione verbale (linguistica) nonché è responsabile della «trasduzione» del materiale visuo-spaziale in forma verbale, ed il *taccuino visuo-spaziale* (TVS), il quale mantiene, manipola ed elabora l'informazione sia visiva che spaziale, utilizzandola per risolvere problemi¹³; infine, il quarto ed ultimo componente della MdL è il *buffer episodico*¹⁴ (BE), che ha prevalentemente funzioni di collegamento bidirezionale sia fra la MdL e la MLT per il recupero di informazioni sia fra le componenti interne della MdL, di integrazione (*binding*) multidimensionale delle informazioni espresse in vari codici¹⁵, nonché tiene in debita considerazione le modalità con cui i fattori affettivo-emotivi influenzano la MdL; il BE assume un ruolo cruciale nel mettere in relazione i contenuti della MdL con la MLT e viceversa, ed ha un diretto legame con l'EC nel creare (*binding*) e mantenere (in forma episodica, appunto) un'informazione integrata spazio-temporalmente da quanto proviene, in modalità multicanale, dalle altre due componenti della MdL (cioè, LF e TVS) attraverso la mediazione della coscienza¹⁶, crea nuove rappresentazioni cognitive complesse (facilitando così

7 In effetti, il *sistema attentivo superiore* (SAS), qui identificabile con l'EC (Grossi & Trojano 2013, Cap. 2, § 5) per specificarne ulteriormente la struttura e la funzionalità, è stato separatamente introdotto da Donald A. Norman e Tim Shallice nei primi anni '90 dello scorso secolo come modello cognitivo dell'attenzione. L'informazione sensoriale elaborata dalla percezione fornisce un output poi modulato dall'attenzione selettiva e da quella spaziale, quindi ha accesso ad un sistema di schemi (nucleo del SAS) alcuni dei quali possono così venire più o meno attivati, guidando il comportamento; questi schemi competono fra loro secondo il meccanismo della selezione competitiva e lo schema che così raggiunge il più alto livello di attivazione prevale, inibendo i rimanenti; tale schema predominante, a cui il SAS (che possiede una rappresentazione completa delle intenzioni dell'individuo e delle condizioni ambientali interne ed esterne) attribuisce (in maniera differenziale e strategica) maggiori livelli attentivi in base alle finalità dell'azione, a sua volta entra in contatto con quanto immagazzinato in MLT (perlopiù, il materiale della memoria implicita), attivandosi così quella specifica procedura per compiere l'azione corrispondente a quello schema (predominante), attraverso un sistema effetto interno al SAS stesso (Legrenzi & Umiltà 2016, Cap. IV).

8 Altri autori – fra cui lo stesso Baddeley – ritengono invece che il centro della coscienza sia il buffer episodico (Fabbro 2016, p. 361; LeDoux 2020, p. 335).

9 Gli studi di neuroscienze (condotti con sofisticate tecniche di neuroimmagine) sugli stati di coscienza umana, riferiscono per esempio che in un individuo sottoposto a certi stimoli visivi, quando questi sono riferibili verbalmente, allora vengono attivate le aree della corteccia visiva (occipitale) e le aree del circuito corticale cognitivo generale che sono alla base della MdL, in particolare le aree della corteccia prefrontale (e, in alcuni casi, anche della corteccia parietale), mentre allorché non è possibile fornirne un resoconto verbale, viene attivata solo la corteccia visiva. Per molti ricercatori, ciò indica che per avere un'esperienza fenomenicamente cosciente e verbalmente riferibile di stimoli visivi, l'elaborazione sensoriale nella corteccia visiva deve essere ulteriormente elaborata dai circuiti del controllo cognitivo alla base della MdL (LeDoux 2020, Cap. 52).

10 Che non può essere condotto in maniera automatica (Fabbro 2016, p. 360).

11 I neostrutturalisti (o neo-piagetiani) inoltre ritengono fondamentale tener conto non solo dei modelli di coordinamento-attivazione (come considerati dalla teoria piagetiana) durante lo sviluppo cognitivo, ma anche – in misura eguale – dei modelli di selezione-inibizione che, sempre nell'ambito dell'insieme delle funzioni esecutive, permettono operazioni di inibizione efficiente/inefficiente e di resistenza alle interferenze, in quanto l'apprendimento, diversamente dalla classica prospettiva piagetiana, non consiste soltanto della progressiva acquisizione di conoscenze e di strutture di complessità crescente, ma anche della capacità di inibizione sia di informazioni non pertinenti sia di reazioni che ostacolano conoscenze già acquisite (Houdé et al. 2000, pp. 476-484).

12 Si parla pure di *circuito fonologico* (Papagno 2003, Cap. I.2).

13 Sia il LF che il TVS si suddividono poi in due componenti, ovvero un magazzino a breve termine (fonologico/visuospaziale) e un meccanismo di ravvivamento (*rehearsal o loop articolatorio*): il primo è un magazzino di memoria a breve termine che contiene solo informazioni (di tipo verbale/non verbale), mentre il secondo interviene per trasformare le informazioni in entrata in ciascuno di questi due magazzini in informazione specifica (verbale/visuospaziale) nonché per prolungarne la permanenza (Legrenzi & Umiltà 2016, Cap. IV).

14 Si parla di buffer episodico in quanto esso permette di coordinare episodicamente, cioè integrare nello spazio e nel tempo, le informazioni presenti in MdL. Esso è un sistema distinto dalla cosiddetta *memoria episodica* (Mangini 2003, p. 661). La MdL, in quanto seleziona, associa e integra le informazioni presenti, attimo dopo attimo, nella memoria sensoriale, ripassandole mentalmente, combinandole quindi con le informazioni già presenti in MLT (tramite EC e BE); si presume dunque che il richiamo conscio di ogni informazione dalla MLT richieda appunto l'intervento della MdL quale memoria operativa (Kandel 2007, p. 101).

15 Ad esempio, il BE fornisce rappresentazioni integrate d'informazioni linguistiche e visuo-spaziali disponibili in un dato contesto (Marini 2016, p. 120).

16 Si dice pure, in modo pittoresco, che tale informazione integrata è "messa in scena" come in un teatro (Gatti & Vecchi 2020, Cap. 2).

compiti di problem solving, etc.) da poter immettere poi nella MLT, nonché permette, secondo Baddeley, la distinzione fra ricordi veri e falsi, confabulazioni, pensieri deliranti, etc. (Baddeley et al. 2011, Cap. 3; Brandimonte 2004, Cap. 5; Fabbro 2016, Cap. 30; Gatti & Vecchi 2020, Cap. 2; Guerini & Marraffa 2019, Cap. 7; Ládavas & Berti 2020, Cap. 7; Legrenzi & Umiltà 2016, Cap. IV; Macchi Cassia et al. 2012, Cap. 4; Mangini 2003, Cap. 27; Marini 2016, Cap. 6; Purves et al. 2015, Cap. 13).

Secondo le più recenti prospettive neuropsicobiologiche, la memoria di lavoro (MdL) sarebbe, poi, prevalentemente localizzata nei *lobi frontali* (LeDoux 2020, Cap. 49); invero quest'ultimi, e in particolare le loro porzioni più anteriori (*aree prefrontali*), svolgono – nell'uomo e nei primati non umani – un ruolo cruciale nella cognizione e nella regolazione del comportamento adattivo all'ambiente e, in generale, nel controllo dei processi cognitivi superiori (*funzioni esecutive*): organizzazione ed esecuzione dei movimenti, pianificazione ed esecuzione di articolati schemi di strategia e azione, controllo generale dei processi cognitivi, ragionamento, comunicazione, regolazione del comportamento affettivo-emotivo, metacognizione, cognizione sociale (Fuster, 2002; Grossi & Trojano 2013, Cap. 1). Le funzioni esecutive – vale a dire, i processi di azione e controllo – assicurano all'uomo il massimo della flessibilità e creatività al suo comportamento, che altrimenti risulterebbe limitato ad attività stereotipate (Nicoletti et al. 2008, Parte V). Persone con lesioni in queste aree cerebrali (detti *pazienti frontali*), riportano deficit a carico di queste importanti funzioni: infatti, s'è appurato come questi pazienti svolgano con difficoltà compiti di problem solving e di ragionamento che richiedono mantenimento, generazione o cambiamento di strategie e piani d'azione finalizzati. Le neuroscienze, d'altronde, confermano l'attivazione appunto delle aree frontali (in special modo, quelle prefrontali, nello specifico, la superficie dorsolaterale) durante attività di problem solving e nel ragionamento (Kandel 2012, pp. 368, 380, 426; Oliverio 2017, Cap. 3); l'attivazione frontale è inoltre collegata al funzionamento della memoria di lavoro (MdL), in quanto s'è assodato come la pianificazione e l'esecuzione di compiti cognitivi difficili, che sovraccaricano la MdL, mostrano proprio l'attivazione dei lobi frontali (soprattutto) e parietali (Berardi & Pizzorusso 2006, Cap. 9; Nicoletti et al. 2008, Parte VI; Papagno 2010, Cap. 2). D'altra parte, come dimostrano altri studi di neuropsicologia cognitiva, ragionamento, capacità di problem solving e, in generale, tutte le funzioni esecutive, sono proprio legati al funzionamento della MdL, per cui è stato ipotizzato (e poi constatato) come deficit nel ragionamento e in compiti di problem solving possano dipendere da lesioni frontali¹⁷ a carico quindi della MdL (Grossi & Trojano 2013, Cap. 1; Brandimonte 2004, Cap. 5; Nicoletti et al. 2008, Parte IV; Taylor, 2007). Risulta, dunque, chiaro come la MdL sia, da un punto di vista neuropsicologico, un sistema modulare cruciale per la pianificazione e l'esecuzione di diversi compiti cognitivi, fra cui la comprensione, l'apprendimento, il ragionamento (Cornoldi, 1995, 2007; Longoni 2000, Cap. 1). La compresenza, poi, nella MdL, sia di un componente preposto all'informazione linguistico-verbale (loop articolatorio-LA) che di un componente deputato all'informazione visuo-spaziale (taccuino visuo-spaziale-TVS), indipendenti fra loro ma interconnessi per mezzo dell'esecutivo centrale (EC), rendono la MdL (nel modello di Baddeley-Hitch) come la più probabile funzione psichica complessa in cui hanno luogo i sopra menzionati processi mentali generali riguardanti sia la matematica che le scienze naturali, discipline le quali, come già detto (Cheng et al., 2022; Wang et al., 2022), elicitano principalmente i due network neuronali semantico (verbale) e visuo-spaziale (non verbale); ciò è anche in coerenza col fatto che la MdL non deve essere intesa come localizzata in una sola area cerebrale ma come un sistema modulare¹⁸: difatti, le ricerche neuroscientifiche, riferiscono che il suo funzionamento è piuttosto legato all'attivazione di un insieme di circuiti neurali per le funzioni visuo-spaziali, quelle filogeneticamente più antiche, coinvolgenti diverse aree corticali bilaterali (in primis, i lobi frontali e parietali) e subcorticali (fra cui, i gangli della base e l'ippocampo), con il successivo reclutamento, in tempi filogeneticamente più recenti, di aree frontotemporali sinistre (per l'accomodamento linguistico) (Ládavas & Berti 2020, Cap. 7). A tal proposito, è interessante pure il modello neuropsicologico 4-CAPS (per la pianificazione visuo-spaziale), proposto in (Newman et al., 2003), in cui, per l'appunto, è stato sperimentalmente assodato il ruolo predominante svolto dai lobi frontali e parietali nei compiti di risoluzione di problemi visuo-spaziali (fra cui, per esempio, il ben noto *problema del commesso viaggiatore-TSP*); di più, le reti neurali fronto-parietali¹⁹ risultano essere il principale substrato neurobiologico dell'attenzione sostenuta, selettiva e visuospatiale che, a loro volta, fanno parte di un più vasto e composito *network di controllo attenzionale* comprendente diverse aree visive (Denes et al. 2019, Capp. 30, 31; Marini 2016, Cap. 5).

17 Ciò, d'altra parte, è in linea con le altre ricerche neuropsicologiche sulla senescenza, le quali dimostrano, appunto, un progressivo e generale deterioramento dei lobi frontali, con una diminuzione dell'efficienza cognitiva conseguente ad un depauperamento delle prestazioni legate alla memoria di lavoro, per lo stretto legame esistente fra funzioni esecutive e MdL (Nicoletti et al. 2008, Parte V).

18 Tuttavia, si ritiene che la sua base neuroanatomica principale sia la corteccia prefrontale (LeDoux 2020, Cap. 49); così, quando si parla di MdL non si dovrebbe intendere, come la parola farebbe pensare, ad una funzione mnestica pura, ma piuttosto come un riferimento al sistema delle funzioni esecutive, ovvero a quelle importanti funzioni cognitive di controllo che selezionano ed organizzano le altre funzioni mentali e dipendono da meccanismi neurali situati prevalentemente nella corteccia prefrontale (LeDoux 2020, Capp. 49, 50; Legrenzi & Umiltà 2016, Cap. IV).

19 La corteccia prefrontale riceve gran parte dei suoi input dalle cortecce sensoriali secondarie, nonché è riccamente interconnessa con la corteccia parietale; le proiezioni della corteccia prefrontale si estendono poi principalmente ai gangli della base ed ai sistemi motori corticali che, nel complesso, contribuiscono ad avviare, controllare e inibire regole per azioni e comportamenti finalizzati. Le regioni della corteccia prefrontale e di quella parietale costituiscono, nel loro insieme, il principale substrato neuroanatomico della MdL (Purves et al. 2015, Cap. 13).

Le neuroscienze infatti concordano nel ritenere che il cervello umano sia prevalentemente visivo²⁰: circa la metà delle sue strutture è difatti addetta alla visione, il che condiziona diversi aspetti delle attività mentali. Le competenze e abilità visive della mente umana sono ancora più espanse nell'infanzia: un bambino ha un'incredibile capacità di registrare informazioni visive sotto forma di immagini grazie alla massiccia memoria iconica di cui è predisposto il suo cervello, mentre non altrettanto di verifica per l'informazione uditiva. Rappresentare la realtà tramite immagini significa dunque memorizzare in modo più solido ed efficace, e di conseguenza imparare meglio, di quanto non avvenga a mezzo della sola trasmissione orale o della lettura, cioè attraverso codici semantici basati sul significato: è invero stato calcolato che esperienze visive sono 3-4 volte più efficaci di quelle uditive e che quelle audiovisive sono a loro volta più efficaci di quelle visive, per cui un metodo di apprendimento che passi prevalentemente per un codice orale (parola scritta o parlata) è di gran lunga inferiore ad un metodo di tipo audiovisivo (impennato proprio sull'uso abbinato di due diversi codici, verbale e non verbale); ma l'esperienza visiva va sempre e comunque coadiuvata con opportune spiegazioni e interpretazioni verbali²¹ che si incentrano sulla elaborazione²² del materiale presentato da apprendere²³, in un processo che collega quanto v'è di nuovo con quanto già acquisito: perché ciò abbia luogo, la nostra mente deve dunque confrontare (nella MdL) la nuova informazione data con una serie di esperienze, più o meno simili, le quali hanno lasciato una traccia nella nostra memoria a lungo termine (MLT) e che appartengano alle stesse categorie, ciò essendo peraltro in linea con la teoria dell'apprendimento di Lev S. Vygotskij e la sua notevole nozione di *zona di sviluppo prossimale*²⁴. D'altra parte, la formazione sia delle immagini mentali che dei *modelli mentali* (secondo P. Johnson-Laird) viene attribuita proprio al taccuino visuospatiale, il quale, recuperando conoscenze (dalla MLT) in forma astratta, lo mantiene attivo in forma visuospatiale, in modo che esso possa poi essere ulteriormente elaborato, in cooperazione con il circuito fonologico, sotto la sovraordinazione dell'esecutivo centrale (Baddeley et al. 2011, Cap. 4; Bara 1990, Cap. 5; Oliverio 2013, Introduzione; Kandel, 2012; Oliverio 2017, Cap. 2). Il neocostruttivismo riconosce poi, a differenza della teoria piagetiana, il ruolo delle competenze precoci del bambino (*cognizione infantile*), alcune delle quali sarebbero innate e grazie alle quali – secondo Roger Lécuyer – il bambino avrebbe così delle facoltà di apprendimento mediate proprio dalla percezione, in particolare quella visiva, ritenuta essere preprogrammata (Houdé et al., 2000).

Nel caso di un'informazione di tipo verbale, la capacità di fissarla e di rievocarla viene aumentata notevolmente se si stabiliscono pure associazioni di tipo visivo²⁵: ad esempio, per un bambino (ma anche per gli adolescenti), è sufficiente convertire termini astratti, come "forza", "equilibrio", "dubbio", in termini visivi e spaziali opportuni (per esempio, "un leone", "quel giocoliere", "una persona che si gratta la testa" per un bambino, oppure disegni, figure, schemi, etc. per adolescenti, che hanno una maggiore capacità astrattiva rispetto alla mente concreta di un bambino) per trasmettere alla mente un messaggio più efficace e duraturo, ancorché associato ad opportune interpretazioni e spiegazioni perché vedere semplicemente non comporta comprendere ed essere consapevoli del significato di quanto viene percepito visivamente (Miller 1994, p. 279; Oliverio 2017, Cap. 2). Ciò è peraltro in linea con quanto detto sopra circa la *teoria del doppio codice* di A. Paivio. In particolare, gli studi di neuropsicologia circa l'intelligenza logico-matematica riferiscono che essa fa capo a due diverse componenti, una visivo-spaziale ed una linguistica, la prima più concreta, la seconda più astratta e simbolica, la prima soggetta ad uno sviluppo più precoce, la seconda ad uno sviluppo più tardivo,

20 Le attuali conoscenze neurobiologiche, possono supportare l'importanza delle capacità visuospatiali nell'apprendimento. Infatti, la recente scoperta delle cosiddette *cellule di concetto*, localizzate nell'area mesiale della corteccia temporale (la quale comprende principalmente l'ippocampo, l'amigdala e le cortecce entorinale, peririnale e paraippocampale), che si attivano alla visione di certe immagini significative le quali possedevano inoltre una relazione di contenuto fra loro, lascia presagire come tali cellule svolgano un ruolo notevole per il sistema di memorie dell'essere umano (Pinel & Barnes 2018, Cap. 13).

21 Questo perché il consolidamento delle memorie richiede un processo di analisi che permetta di immagazzinarle in associazione ad altre di tipo simile, e ciò può avvenire solo grazie alle funzioni associate all'area di Wernicke, fra le quali quella semantica. Invero, una parte cospicua delle esperienze sensoriali umane, i cui dati vengono dapprima raccolti in una specie di *memoria sensoriale*, viene convertita nei loro equivalenti verbali prima di venir depositata nelle aree cerebrali della memoria e prima di essere elaborata per altre finalità intellettive: ad esempio, quando si legge un testo scritto, per lo più non si fissano le immagini visive delle parole stampate che lo costituiscono, bensì queste vengono invece rilevate in forma di *simboli verbali* prima ancora di comprenderne il significato. Tutto ciò è possibile grazie proprio all'attivazione dell'area di Wernicke che, come già detto, riveste un ruolo cruciale per le funzioni intellettive superiori dell'uomo (Guyton 1996, Cap. 19; Marini 2016, Cap. 6) e che può considerarsi il principale substrato neuroanatomico del codice (o registro) verbale di cui alla teoria della doppia codifica di A. Paivio.

22 Ciò è anche coerente col presupposto secondo cui esiste un legame fra elaborazione semantica e sviluppo della memoria (Gatti & Vecchi 2020, p. 86).

23 Difatti, alcuni esperimenti condotti da Albert Bandura e collaboratori sullo sviluppo della funzione simbolica all'interno della sua teoria dell'apprendimento sociale, confermano che una codifica verbale facilita l'apprendimento osservativo (Miller 1994, p. 215).

24 Per una discussione critica della teoria vygotskijana, si veda (Miller 1994, Cap. 7).

25 Questo, anche perché i due canali di comunicazione (i.e., verbale e non verbale) attraverso cui l'informazione entra nella MdL risultano fisiologicamente specifici e anatomicamente distinti, dunque con trascurabili interferenze (Carlson 1986, Cap. 19). D'altra parte, la cognizione umana non può essere pensata solo tramite aspetti verbali, in quanto entrano in gioco anche specifiche di natura visuospatiale (Gatti & Vecchi 2020, p. 32).

da un punto di vista ontogenetico (Oliverio 2011, Cap. IV). Studi neuropsicologici su pazienti affetti da negligenza spaziale unilaterale (NSU) hanno suggerito come la codifica spaziale di uno stimolo costituisca un prerequisito necessario per la sua consapevolezza, ovvero per la sua elaborazione esplicita, ma non sufficiente per raggiungere il livello di coscienza (Nicoletti et al. 2008, Parte I). In quest'ultimo caso, forse, la teoria del doppio codice di A. Paivio potrebbe fornire sostegno all'ipotesi di coadiuvazione, svolta dal contemporaneo uso del codice verbale, nell'esplicitazione ottimale del codice spaziale a che esso divenga pienamente cosciente; secondo quest'ultima teoria, le informazioni immagazzinate con un doppio registro, verbale e di immagine, sono meglio memorizzabili rispetto a quelle immagazzinate con una modalità solo verbale (Bara 1990, Cap. 5). L'utilizzo di immagini nel ricordo dà prestazioni e risultati migliori rispetto a forme di elaborazioni verbali per via di quel fenomeno, scoperto proprio da A. Paivio (1986) e detto *picture superiority effect*, secondo cui v'è la tendenza, a parità di condizioni, a ricordare con maggior accuratezza le immagini che le parole (Gatti & Vecchi 2020, p. 78).

D'altro canto, recenti studi neuropsicologici relativi all'invecchiamento hanno testato l'efficacia del *paradigma del cambio di compito* nella valutazione dell'efficienza delle funzioni esecutive: il suo principio di metodo si fonda sulla capacità di alternare velocemente l'esecuzione di due compiti distinti; passare da un'azione all'altra, da un compito all'altro, significa anzitutto cambiare *task set* o *set mentale* (*shifting*), che è l'insieme delle conoscenze e delle regole necessarie a svolgere un compito e la loro associazione con schemi sensori-motori che ne permettono l'esecuzione ottimale; quindi, si valuta il cosiddetto *costo totale del cambio di compito*, connesso alla conseguente riorganizzazione cognitiva dovuta al recupero delle conoscenze necessarie per lo svolgimento del nuovo compito, col conseguente *task set switch* o *riconfigurazione del set mentale*. S'è appurato sperimentalmente come l'efficienza di tale cambio di compito dipenda proprio dalla prestazione dell'esecutivo centrale (EC, nel modello della MdL), da cui dipende l'efficacia del controllo esecutivo connesso (Nicoletti et al. 2008, Parte V). È chiaro quindi come l'interdipendenza fra i due registri verbale e non verbale della teoria del doppio codice di Paivio, nonché la loro correlazione bidirezionale può, secondo questa prospettiva, essere utilmente sfruttata, nella pratica didattica, per potenziare le funzioni esecutive.

Il ruolo preminente giocato dalle abilità visuo-spaziali nella cognizione numerica è stato sperimentalmente appurato nei pazienti affetti dalla cosiddetta patologia da *neglect* (o *emineglect*), un disturbo dell'attenzione per lo spazio di sinistra dovuto ad una lesione cerebrale al lobo parietale destro. Gli studi neuropsicologici relativi a questo disturbo hanno rilevato infatti che tutti i compiti aritmetici attivano, in modo sistematico, la corteccia parietale posteriore superiore bilateralmente; questa regione cerebrale fa parte di quel circuito corticale deputato al controllo dell'*attenzione spaziale*. Questi risultati hanno fornito prove attendibili di una organizzazione spaziale nella rappresentazione mentale dei numeri, ed il fatto che il neglect sia fondamentalmente un deficit dei meccanismi attentivi suggerisce come l'attenzione spaziale giochi un ruolo determinante nella cognizione numerica. In particolare, il risultato più importante desumibile da questi studi è stato quello di aver potuto constatare l'esistenza di un omeomorfismo fra due differenti domini di rappresentazione mentale: quella dei numeri e delle linee visive. Ciò suggerisce l'ipotesi secondo cui il cervello umano è capace di adattare e di riciclare i suoi circuiti sensori-motori per rappresentare i numeri su una linea spazialmente orientata. Oltre a ciò, gli studi su soggetti normali riguardanti gli effetti psicofisici dell'elaborazione numerica (quali quelli connessi alle prove di bisezione, di confronto numerico e di giudizio di parità), conducono a ritenere più che valida l'ipotesi dell'esistenza di una *retta numerica mentale* quale rappresentazione semantica di natura spaziale dei numeri, rilevando altresì la sussistenza di una profonda relazione fra i numeri e lo spazio, ovvero di legami spazio-numericici (Nicoletti et al. 2008, Parte VI).

Ulteriori legami spazio-numericici sono stati scientificamente rilevati a livello cerebrale: per esempio, il cosiddetto *effetto Fisher* (o *effetto SNARC*) riassume i risultati di un compito di rilevamento di target laterali localizzati in uno schermo, in cui s'è osservato come numeri piccoli presentati al centro dello schermo facilitavano il rilevamento di target localizzati a sinistra, mentre numeri grandi, sempre presentati al centro dello schermo, facilitavano invece il rilevamento di target localizzati a destra, per cui se ne deduceva come la semplice presentazione di numeri, irrilevante ai fini del compito spaziale assegnato, in ogni caso attivavano automaticamente la linea numerica mentale (in cui i numeri piccoli sono disposti nella sua parte sinistra e i numeri grandi in quella destra), inducendo di conseguenza un effetto spaziale; in sostanza, i numeri spostano l'attenzione spaziale. Visto, dunque, che l'attivazione della linea numerica comporta effetti spaziali, gli studiosi hanno anche ipotizzato (e poi sperimentalmente associato) che, viceversa, la stessa linea numerica mentale sia influenzata da stimoli spaziali, ovvero sia stimoli visuo-spaziali possono causare effetti numerici. Tuttavia, la sperimentazione ha altresì rilevato che le due rappresentazioni dello spazio percepito e dello spazio numerico possono interagire fra loro solo se attivate al contempo, come pure è stato osservato che l'attivazione della rappresentazione spazio-numericica (cioè, la linea numerica mentale) richiede sia l'elaborazione percettiva che quella semantica dello stimolo, mentre l'attivazione della rappresentazione spaziale richiede solamente l'elaborazione percettiva dello stimolo spaziale. Se, poi, l'informazione numerica viene presentata appena poco prima dell'informazione spaziale, allora le rappresentazioni di entrambi i due tipi di informazione possono essere contemporaneamente attivate e quindi interagire. Ad ogni modo, i ricercatori hanno anche appurato che l'effetto Fisher sussiste indipendentemente dalla specializzazione emisferica, ma dipende, molto probabilmente, dalla maniera in cui si impara a scrivere e leggere, da sinistra verso destra

(come per gli occidentali) oppure da destra verso sinistra (come per molti popoli asiatici). Dunque, concludono come l'orientamento della scrittura e della lettura abbia, molto probabilmente, una certa notevole influenza nel determinare l'associazione spazio-numero²⁶ (Nicoletti et al. 2008, Parte VI). In conclusione, tutta questa serie di studi sulle basi neuropsicologiche della cognizione numerica mostrano come le rappresentazioni mentali nell'uomo abbiano una natura prevalentemente visuo-spaziale e che l'elaborazione di grandezze aritmetiche coinvolga l'attenzione visuo-spaziale; ciò può estendersi – si ipotizza – ai più generali processi cognitivi astratti (Bisiacchi & Vallesi 2017, Cap. 3). D'altronde, le rappresentazioni visuospatiali sono senz'altro oramai ritenute un più che valido ausilio didattico per qualsiasi contenuto di apprendimento, sulla base proprio delle conoscenze fornite dalle neuroscienze (Rivoltella 2012, Cap. 4).

2.1.1. Ulteriori approfondimenti di neuroscienze e psicologia

A. Da quanto finora detto, emerge chiaro quale ruolo fondamentale, dal punto di vista neuropsicologico, svolge la memoria di lavoro (MdL) nei processi di apprendimento-insegnamento. In questa sezione, dunque, approfondiremo ulteriormente tale argomento, seguendo principalmente (Papagno, 2003).

La *memoria a breve termine*, o *memoria primaria*, si suddivide in due sottosistemi: la *memoria a breve termine verbale* (o *memoria fonologica*) (MBT verbale) e la *memoria a breve termine visuospatiale* (MBT non verbale). La MBT verbale a sua volta si suddivide in altri due sottosistemi: il *magazzino fonologico*, dove si deposita, per brevi intervalli di tempo (dell'ordine dei secondi, circa) l'informazione verbale ricevuta (perlopiù, foneticamente²⁷), e il *loop articolatorio*, in cui tale informazione verbale viene ripassata o ripetuta subvocalmente o vocalmente (*ripasso articolatorio*), grazie a cui si crea una sua rappresentazione fonologica²⁸. La MBT verbale è stata la sottocomponente più studiata finora, per le sue strette correlazioni con il linguaggio. La MBT non verbale, più comunemente nota come *taccuino visuospatiale*, è deputata alla formazione, al mantenimento e alla manipolazione delle immagini mentali; essa, parimenti alla MBT verbale, si suddivide in altri due sottosistemi: il *visual cache* (VC), strettamente correlato al sistema visuoperceptivo e l'analogo corrispondente del magazzino fonologico della MBT verbale, il quale mantiene l'informazione visiva e spaziale per pochi secondi, e l'*inner scribe* (IS), l'analogo corrispondente del loop articolatorio della MBT verbale, che trattiene informazioni relative alla dinamica delle immagini mentali (sequenze di movimenti, etc.) ed ha anche la funzione di mantenimento delle immagini mentali del VC; alcuni studiosi, ritengono poi che quest'ultima componente sia, a sua volta, suddivisa in altri due sottosistemi, uno specializzato nell'informazione spaziale, l'altro nella informazione visiva. Le conoscenze scientifiche sulla MBT non verbale sono molto inferiori a quelle relative alla MBT verbale; ad ogni modo, un ruolo precipuo svolto dalla MBT non verbale sembra riguardare la manipolazione delle immagini mentali: così, ad esempio, se si richiede la descrizione di un oggetto, questo può essere anzitutto richiamato dalla MLT, ma, per continuare nella descrizione, è necessario mantenere la sua immagine mentale in un magazzino a breve termine – i.e., il visual cache – il tempo giusto indispensabile per poter continuare ad esaminarlo mentalmente; parimenti, se viene richiesta la descrizione mentale di un oggetto sottoposto a trasformazioni spaziali (ad esempio, rotazioni), ed in tal caso si attiva l'inner scribe: Infine, da un punto di vista neuroanatomico, i correlati neurali della MBT sembrano coinvolgere la corteccia parietale inferiore dell'emisfero sinistro per la MBT verbale, quindi la corteccia (temporo-)parieto-occipitale dell'emisfero destro per la MBT non verbale²⁹. I due sottosistemi MBT verbale e MBT non verbale, sarebbero poi sotto il controllo e il coordinamento di una delle componenti principali della MBT, detta *esecutivo centrale* (EC), individuata empiricamente perlopiù attraverso i cosiddetti esperimenti di *doppio compito*, ed i cui correlati neurali starebbero prevalentemente nelle aree prefrontali con le loro proiezioni corticali e sottocorticali (Bara 1990, Cap. 5; Marini 2016, Cap. 6; Papagno 2003, Capp. I.2, I.3).

Dunque, la memoria di lavoro è un sistema necessario a trattenere e manipolare informazioni nel mentre si eseguono un'ampia gamma di compiti, fra cui l'apprendimento, il ragionamento, la comprensione; l'esecutivo centrale sarebbe poi il responsabile del controllo attenzionale della memoria di lavoro, sistema operativo la cui funzionalità è molto sensibile e vulnerabile (Papagno 2003, Cap. I.3).

B. Sebbene le aree corticali abbiano specifiche funzioni, alcune di queste sono connesse fra loro, dando luogo a delle aree di maggiore complessità funzionale: esse si compongono di aree motorie primarie e secondarie e di aree sensoriali primarie e secondarie, dove quelle secondarie hanno la funzione dapprima di integrare le informazioni provenienti da

26 Le ultime considerazioni qui svolte, debbono, tuttavia, prendere sempre in considerazione il fatto che il cervello è un organo plasmabile e ciò che rende, alla fin fine, valida un'abilità matematica è l'esperienza (nei suoi tempi e nei suoi modi) che si fa con il mondo dei numeri (Girelli 2006, p. 122).

27 Anche leggendo un'informazione, questa viene sempre trascritta da un *codice grafemico* a un *codice fonologico* (solitamente, con modalità subvocalica) prima di essere immessa nel magazzino fonologico (*ricodificazione fonologica*).

28 In condizioni sia normali che patologiche, l'assenza di questa seconda sottocomponente della MBT verbale, specificatamente detta *soppressione articolatoria*, impedisce all'informazione verbale di lasciare una traccia mnestica nella MBT verbale.

29 Ovvero, le aree fronto-parietali sinistre per la MBT verbale, le aree fronto-parietali destre per la MBT non verbale, fino alle aree posteriori del cervelletto ma in modo crociato (Gatti & Vecchi 2020, p. 58).

quelle primarie, quindi dare loro significato. Oltre queste aree motorie e sensoriali, esistono poi altre aree che ricevono e analizzano informazioni provenienti da molte altre aree corticali e sottocorticali, dette *aree associative*. Di queste, le più importanti sono le seguenti: l'*area di associazione parieto-occipito-temporale*, l'*area di associazione prefrontale*, l'*area di associazione limbica*. L'area di associazione parieto-occipito-temporale occupa l'ampia zona corticale compresa tra la corteccia sensoriale somatica (anteriormente), la corteccia visiva (posteriormente) e quella uditiva (lateralmente) e provvede ad una fine analisi interpretativa del significato da dare ai segnali provenienti da tutte le aree sensoriali che essa comprende e quelle limitrofe, permettendo la coordinazione spaziale, la comprensione del linguaggio scritto e parlato (via l'area di Wernicke), il riconoscimento quindi la denominazione di oggetti. L'area di associazione prefrontale lavora in stretta associazione con la corteccia motoria e con l'area parieto-temporo-occipitale che trasmette ad essa per il tramite di un cospicuo fascio subcorticale di fibre di connessione, ricevendo così un consistente flusso di informazioni sensoriali già analizzate, soprattutto circa quelle riguardanti la coordinazione spaziale; la corteccia prefrontale è inoltre essenziale per l'attuazione di processi mentali a lungo termine che, si presume, siano dovuti alla sopramenzionata stretta correlazione funzionale con la pianificazione di attività motorie, utilizzate tuttavia per elaborazioni mentali. In questa area, si trova inoltre l'*area di Broca*, deputata alla formazione delle parole, strettamente correlata all'*area di Wernicke* (localizzata nel lobo temporale) per mezzo del cosiddetto *fascicolo arcuato*. Infine, l'area di associazione limbica, che comprende tutte quelle strutture cerebrali mediobasali che complessivamente formano il cosiddetto *sistema limbico*, presiede soprattutto al comportamento, all'emotività e alla motivazione; è da questa zona che partono tutti gli impulsi che attivano le altre aree cerebrali, nonché la spinta motivazionale per i processi di apprendimento (Guyton 1999, Cap. 19).

L'*area di Wernicke* (anche assieme al giro angolare dell'emisfero dominante), svolge un ruolo cruciale per meccanismi intellettivi. Infatti, in essa confluiscono le informazioni di tipo sensoriale uditive, visive e somatiche, provenienti dalle rispettive aree sensoriali secondarie, e si trova nell'emisfero dominante (il sinistro nei destrimani). Un danno cerebrale in quest'area può non impedire di comprendere uditive le parole, ma fa perdere la capacità di ordinarle in un pensiero ben formato che abbia dunque un significato; parimenti, si è ancora in grado di leggerle, ma senza capire il pensiero da loro espresso. In generale, l'area di Wernicke è ritenuta la sede di notevoli e complesse rappresentazioni mentali di passate esperienze sensoriali, permettendone l'interpretazione. Una parte cospicua delle nostre esperienze sensoriali viene convertita, nell'area di Wernicke, nei loro equivalenti verbali (*simboli verbali*) prima di essere depositata in memoria nonché utilizzata in altre elaborazioni mentali; tale area è associata strettamente alle aree uditive sia primarie che secondarie probabilmente perché il linguaggio viene appreso alla nascita in modalità fonetica, solo successivamente, quando si apprende il linguaggio scritto mediante lo sviluppo ulteriore della percezione visiva, anche l'informazione visiva (proveniente dalle aree visive primarie) viene incanalata nelle regioni temporali del linguaggio già sviluppate foneticamente (giro angolare, quindi area di Wernicke), dando luogo al *simbolismo verbale*. L'area di Broca poi provvede alla trasduzione motoria (quindi fonatoria) per la pronuncia. Lesioni nell'area di Wernicke comportano la perdita delle principali funzioni del pensiero: abilità di lettura, abilità formali, abilità logiche (Guyton 1999, Cap. 19).

C. Le *funzioni esecutive*, strettamente correlate alle funzioni attentive e di controllo, permettono la pianificazione di un'azione finalizzata al conseguimento di un determinato obiettivo, utilizzando la memoria di lavoro (MdL) per tener traccia dei movimenti e dei pensieri già elaborati in vista del conseguimento dell'obiettivo prefissato (Marini 2016, Cap. 5); esse riguardano la scelta di quali processi cognitivi attuare (coscientemente o meno) in base al contesto ed al loro controllo attraverso ben precise regole che guidano il comportamento umano. La specificità delle regole è garantita da gruppi di neuroni selettivi presenti nelle varie aree della corteccia prefrontale che, in interazione sia con i gangli della base che con la corteccia parietale, possono creare nuove regole sulla base del comportamento finalizzato a certi scopi, valutando anche il valore atteso delle corrispondenti azioni intraprese; queste strutture cerebrali, dunque, sono indispensabili ad un controllo cognitivo del comportamento umano. Oltre alla scelta delle regole operative e al controllo del comportamento, le funzioni esecutive includono pure l'inibizione di informazioni o comportamenti, irrilevanti, distraenti o inopportuni, e l'arresto di azioni o comportamenti già appresi e considerati validi, passando ad altre regole, mettendole in relazione fra loro per ottenere una regola più generale. Quest'ultima funzione è anche alla base della costruzione di modelli mentali astratti ed i pazienti frontali mostrano proprio un'incapacità a formare rappresentazioni astratte di ordine superiore; il loro ragionamento è sempre e solo di tipo concreto. Inoltre, la corteccia prefrontale è cruciale in compiti finalizzati a obiettivi superiori³⁰: se l'obiettivo è la ricerca di una ricompensa sicura, da ottenere nel più breve tempo possibile, sulla base solo di quanto è già noto dell'ambiente circostante (*compito di sfruttamento*), allora si attivano principalmente le aree sottocorticali della gratificazione, mentre se l'obiettivo è la ricerca di nuove informazioni circa l'ambiente, spesso a scapito di ricompense sicure e a breve termine (*compito di esplorazione*), allora si attivano soprattutto aree prefrontali e parietali. Dunque, la corteccia prefrontale contribuisce notevolmente al perseguimento di obiettivi a più lungo termine e di ordine superiore. Più in generale, la ricerca attuale in neuroscienze cognitive indica che il lobo frontale fornisce un contributo cruciale alle varie funzioni esecutive, mentre la sua suddivisione in varie aree e il rilevamento delle relative connessioni neurali, permetterebbe una possibile gerarchia organizzativa e funzionale di queste (Purves et al. 2015, Cap. 13).

30 Quanto segue, ha un parallelo analogico con i principi di piacere e di realtà della psicoanalisi freudiana.

Ai nostri scopi, interessa, in particolare, evidenziare il ruolo centrale svolto dal giro cingolato anteriore, la cui parte dorsale sembra attivarsi durante processi esecutivi di tipo cognitivo, mentre la parte ventrale durante compiti emotivi. Inoltre, in compiti di ragionamento, la corteccia prefrontale laterale sinistra svolge un ruolo precipuo nei processi di ragionamento induttivo³¹ e deduttivo, anche se questi hanno luogo in loci specifici di essa: precisamente, alcuni dati suggeriscono che i ragionamenti di tipo induttivo attivano la corteccia prefrontale dorsolaterale (forse, in quanto questi necessitano di una maggiore tendenza a generare e valutare nuove ipotesi), mentre quelli di tipo deduttivo attivano la corteccia prefrontale ventrolaterale (forse, in quanto questi abbisognano di maggiori esigenze sintattico-linguistiche); inoltre, i ragionamenti di tipo deduttivo, sebbene si svolgano nell'emisfero sinistro, possono anche coinvolgere regioni dell'emisfero destro, le omologhe dell'area di Broca (Purves et al. 2015, Cap. 13).

2.2. Possibili applicazioni alla metodologia didattica: costruzione di una UDA

I principi neuropsicologici menzionati alla precedente sezione, si sono resi indispensabili in quanto una qualsivoglia unità didattica di apprendimento deve anzitutto risultare chiara sul piano cognitivo, giacché deve far riferimento a precise competenze intellettuali da mettere in azione durante il processo di apprendimento per essere quindi acquisite dal discente (Bertolini 1996, p. 685). Per quanto s'è detto alla precedente sezione, la *memoria di lavoro* (MdL) è ritenuta la principale funzione psichica in cui hanno luogo i processi cognitivi³², una memoria operativa, tale da essere – a ragione – metaforizzata come una sorta di "lavagna mentale", ovvero come "spazio di lavoro" per i calcoli mentali (Baddeley et al. 2011, Cap. 3; Fabbro 2016, p. 361; Macchi Cassia et al. 2012, Cap. 4; Nolen-Hoeksema et al. 2017, p. 289; Wager & Smith, 2003); il suo modello multicomponenziale consta di quattro sottosistemi: l'*esecutivo centrale* (EC), il *loop fonologico* o *articolatorio* (LA), il *taccuino visuo-spaziale* (TVS) e il *buffer episodico* (BE). L'EC ha proprio nei lobi prefrontali il principale sostrato neurobiologico, gli altri rimanenti sottosistemi componenti sono distribuiti lungo un network neurale fronto-parieto-temporale bilaterale (Aboitiz et al., 2010; Grossi & Trojano 2013, Cap. 4; Nishida et al., 2017), mentre la memoria a lungo termine (MLT) coinvolgerebbe primariamente l'ippocampo, nei pressi del lobo temporo-mediale, la corteccia inferotemporale, la corteccia prefrontale e l'amigdala (Pinel & Barnes 2018, Cap. 11); quindi, nonostante che MdL e MLT abbiano substrati neurali non esattamente sovrapponibili (Nolen-Hoeksema et al. 2017, p. 291), tuttavia i dati scientifici finora ottenuti portano a far pensare che sia processi spaziali lateralizzati, quali l'attenzione visuo-spaziale, che processi non lateralizzati, quali l'attenzione selettiva, poggino sul funzionamento integrato delle medesime aree frontali e parietali (Grossi & Trojano 2013, Cap. 4). Con precisione, studi di neuroimmagine sembrano indicare la presenza di due comuni circuiti neurali bilaterali fronto-parietali per assolvere al funzionamento della MdL, con alcune regioni prefrontali dominio-specifiche per le funzioni verbali (corteccia ventrolaterale sinistra) e non verbali (corteccia dorso-laterale destra) ma con un diverso grado di dissociazione sia in termini qualitativi (tipo di funzione esecutiva attivata) che quantitativi (materiale immagazzinato) (Walter et al., 2003; Zago et al., 2008); altri studi invece sembrano evidenziare una tale dissociazione dominio-specifica più marcata nelle aree parietali che non in quelle frontali (Wager & Smith, 2003). Inoltre, questa dissociazione laterizzata della MdL è alquanto variabile fino alla tarda adolescenza per la incompletezza del neurosviluppo tipico di questo periodo, soprattutto relativamente ai lobi frontali (Andre et al., 2015; Fuster, 2002; Nagel et al. 2013; Oliverio 2017, Cap. 1, p. 18).

Comunque, tutte e quattro le componenti della MdL lavorano in cooperazione fra di loro, prevalentemente in maniera bidirezionale. In particolare, l'EC esercita il suo controllo sui due sistemi LA (che utilizza un codice verbale) e TVS (che utilizza un codice non verbale) in reciproca interazione cooperativa fra loro, complementandosi a vicenda, attraverso l'opera del BE, il quale ha fondamentalmente il ruolo di integrare le informazioni di questi due sistemi (i.e., LA e TVS), rappresentate in due diversi codici³³, combinandole in rappresentazioni unitarie, significative e coerenti (Macchi Cassia et al. 2012, p. 93) di diversi formati che possono variare nel corso dello sviluppo ontogenetico, nonché essere trasmesse alla MLT da cui poi possono essere recuperate sia automaticamente che volontariamente (Macchi Cassia et al. 2012, Cap. 4); molte ricerche, inoltre, suggeriscono che la memorizzazione di informazioni presentate

31 La corteccia prefrontale laterale sinistra è particolarmente importante per generare nuove ipotesi, necessaria per i ragionamenti di tipo induttivo (ma non necessariamente per quelli di tipo deduttivo).

32 Essa svolge un ruolo importante nell'acquisizione di molte abilità cognitive (Valenza & Turatti 2019, p. 98) fra cui l'attenzione, l'autocontrollo, il calcolo mentale, il linguaggio, etc. (Fabbro 2019, p. 57). Se è poi precipuo individuare quelle condizioni che rendono possibile un'elaborazione cognitiva ottimale durante le varie attività di apprendimento, a tal proposito uno dei principali aspetti da considerare, nella progettazione di percorsi di apprendimento, è per l'appunto la limitata capacità di elaborazione della MdL, per cui deve essere considerato con la dovuta attenzione il carico cognitivo che un determinato apprendimento pone al sistema mentale (Valenza & Turatti 2019, p. 160).

33 Ad esempio, il LA può immagazzinare il nome di una persona, mentre il TVS il suo volto, quindi il BE le integrerebbe fra loro, cosicché nome e volto verrebbero alla fine associati in un unico insieme (Baddeley et al. 2011, Cap. 3; Nolen-Hoeksema et al. p. 287).

verbalmente può migliorare se esse vengono pure codificate visivamente oltre che in forma verbale³⁴; dunque, la visualizzazione può migliorare la memoria in molti modi³⁵ (De Beni et al. 2003, Cap. 3; Gray 2019, Cap. 9; Kwon et al., 2002). Ciò ha chiare ripercussioni in pedagogia in quanto, essendo la memoria di lavoro, come già detto, il sistema mentale principale deputato ai processi cognitivi nonché all'elaborazione attiva delle informazioni, il suo funzionamento di base essendo basato proprio sull'interazione cooperativa fra i due suoi sottosistemi LA e TVS, si ritrova, così, una ulteriore conferma neuropsicologica della validità didattica della *teoria del doppio codice* di A. Paivio, che, come suggerito in (Cheng et al., 2022; Wang et al., 2022), dovrebbe essere posto a fondamento della didattica della matematica e delle scienze naturali. Premesso ciò, la UDA che verrà schematicamente esposta nella prossima sezione è stata progettata tenendo proprio in debito conto questi principi-base della neuropsicologia applicata alla didattica delle scienze esatte e naturali (Cheng et al., 2022; Wang et al., 2022): invero, la strategia didattica adottata nella UDA ha sempre affiancato, là dove possibile, alla trattazione verbale-linguistica (ricadente nel dominio dei codici verbali) dei contenuti prettamente matematici (i.e., trigonometria), la corrispondente rappresentazione grafica (dunque, per mezzo di opportuni codici non verbali) dei correlativi argomenti di natura geometrica (i.e., teoria geometrica dei vettori) e viceversa, coerentemente ai precetti della *teoria della doppia codifica* di Allan Paivio (Caviglioli, 2019; Clark & Paivio, 1991), facendo però uso della minima quantità necessaria di informazione esplicativa per entrambi i codici (e ciò per non sovraccaricare la MdL), esponendoli nella maniera più chiara e semplice possibile, nonché facendo sempre e costantemente (là dove possibile) riferimenti esemplificativi contestuali concernenti la realtà concreta³⁶. La prova di valutazione formativa è consistita in due parti: nella prima, si richiedeva di svolgere un compito di geometria vettoriale con relativa rappresentazione grafica mediante disegno tecnico «a mano»³⁷, da eseguire con la maggior precisione possibile³⁸, quindi nella seconda parte si richiedeva la risoluzione di un compito prettamente analitico-formale, strettamente contestuale alla tematica geometrica affrontata nella prima parte. La prova è stata volontariamente divisa in due parti distinte, una imperniata su un codice (o registro semiotico) non verbale (i.e., geometrico), l'altra incentrata su un codice (o registro semiotico) verbale (i.e., analitico), riguardanti entrambe delle tematiche strettamente correlate l'una l'altra (i.e., teoria geometrica dei vettori e trigonometria), sulla base, oltretutto della teoria del doppio codice di A. Paivio, anche della *teoria dei registri semiotici* di Raymond Duval della didattica delle scienze esatte e naturali (D'amore 1999, Cap. 8; Sbaragli, 2005), che – per l'appunto – propugna, tra l'altro, l'importanza delle diverse rappresentazioni semiotiche degli oggetti matematici (Duval, 1995).

34 Ciò è in parte corroborato da alcune delle recenti ricerche in neuroscienze circa la presunta dissociazione lateralizzata della MdL per le funzioni verbali e non verbali, e di cui si è riferito sopra, che riguarderebbe più le aree parietali dei circuiti bilaterali fronto-parietali (basi neuroanatomiche della MdL) che non quelle frontali (EC), dove invece tali funzioni (verbali e non verbali) sarebbero più integrate (Wager & Smith, 2003). Comunque, allo stato attuale, non v'è unanimità di consensi, per una certa discordanza dei dati sperimentali provenienti dalle ricerche in neuroimmagine relative a tale presunta dissociazione (o segregazione) neuro-anatomica circa le funzioni verbale e non verbale della MdL, anche se la una buona parte di queste ricerche sembra propendere per la sua esistenza (Soyuhos & Baldauf, 2023).

35 In pazienti sottoposti a lobectomia dei lobi temporali, dopo la rimozione si rileva spesso un'amnesia anterograda, mostrando una assai scarsa abilità di trasferire informazioni verbali e simboliche della MBT (dunque, della MdL) in MLT, per cui tali pazienti sono incapaci di fissare nuovi contenuti in MLT, quindi di apprendere, per il quale questi due tipi di informazioni (verbali e simboliche) sono le basi, quindi fondamentali per i processi intellettivi (Guyton 1999, p. 275).

36 Ciò perché s'è appurato sperimentalmente che, nell'apprendimento esplicito, le informazioni da apprendere (quindi, da depositare nella MLT) non debbono necessariamente passare per la MBT, né questo dipende dal tempo di ritenzione in MBT, quanto piuttosto dal livello di elaborazione semantica che ne viene data, cioè dalla loro codifica verbale e non verbale (e da qui, il ruolo cruciale della MdL che, ricordiamolo, è distinta dalla MBT), dal livello di profondità di queste, nonché dalla loro modalità (ad esempio, grado di distribuzione dell'esercizio, organizzazione del materiale da apprendere, etc.); delle tracce mnestiche più durature si stabiliscono, in particolare, dopo un'adeguata codifica semantica delle informazioni da immagazzinare, il cui grado di elaborazione dipende poi sia dal livello di attenzione focalizzata sostenuta che dalla sottostante motivazione psicologica ad apprendere (Papagno 2003, Cap. I.12).

37 Il ruolo della "mano" nella cognizione umana è fondamentale sia da un punto di vista filogenetico – in quanto si ritiene che sia stato proprio il suo uso a sviluppare, durante l'evoluzione umana, le capacità visuospatiali (Oliverio 1982, Cap. 5) – sia da un punto di vista ontogenetico – in quanto strettamente e ineludibilmente funzionale allo sviluppo della cognizione nel bambino (Regni & Fogassi, 2019).

38 Questa richiesta, che, di primo acchito, può sembrare inutilmente pedante, si dimostra avere invece delle ben precise motivazioni neuropsicologiche; si consulti, a tal proposito, la monografia (Grossi & Trojano, 2013).

Bibliografia

- Aboitiz, F., Aboitiz, S., García, R.R. (2010). The Phonological Loop. A Key Innovation in Human Evolution. *Current Anthropology*, 51 (1): S55-S65.
- Andre, J., Picchioni, M., Zhang, R., Touloupoulou, T. (2015). Working memory circuit as a function of increasing age in healthy adolescence: A systematic review and meta-analyses. *NeuroImage. Clinical*, 12: 940-48.
- Baddeley, A., Eysenck, M.W., Anderson, M.C. (2011). *La memoria*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Bara, B.G. (1990). *Scienza cognitiva. Un approccio evolutivo alla simulazione della mente*. Bollati Boringhieri editore, Torino.
- Berardi, N., Pizzorusso, T. (2006). *Psicobiologia dello sviluppo. Una introduzione*. Editori Laterza, Roma-Bari.
- Bertolini, P. (1996). *Dizionario di pedagogia e scienze dell'educazione*. Con la collaborazione di L. Caronia, Zanichelli Editore, Bologna, 1996.
- Bertolini, P. (2005). *Ad armi pari. La pedagogia a confronto con le altre scienze sociali*. UTET Libreria, Torino.
- Bisiacchi, P., Vallesi, A. (a cura di) (2017). *Il cervello al lavoro. Nuove prospettive in neuropsicologia*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Brandimonte, M.A. (2004). *Psicologia della memoria*. Carocci editore, Roma.
- Carlson, N.R. (1986). *Fisiologia del comportamento*. Zanichelli Editore, Bologna.
- Caviglioli, O. (2019). *Dual Coding Theory with Teachers*. John Catt Educational, Ltd., Woodbridge (UK).
- Cheng, D., Li, M., Cui, J., Wang, L., Wang, N., Ouyang, L., Wang, X., Bai, X., Zhou, X. (2022). Algebra dissociates from arithmetic in the brain semantic network. *Behavioral and Brain Functions*, 18: 1-12.
- Clark, J.M., Paivio, A. (1991). Dual Coding Theory and Education. *Educational Psychology Review*, 3 (3): 149-210.
- Cornoldi, C. (1995). *Metacognizione e apprendimento*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Cornoldi, C. (2007). *L'intelligenza*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Cornoldi, C., Meneghetti, C., Moè, A., Zamperlin, C. (2018). *Processi cognitivi, motivazione e apprendimento*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Cornoldi, C. (a cura di) (2019). *I disturbi dell'apprendimento*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- De Beni, R., Pazzaglia, F., Molin, A., Zamperlin, C. (2003). *Psicologia cognitiva dell'apprendimento. Aspetti teorici e applicazioni*. Edizioni Centro Studi Erikson, Trento.
- Denes, G., Pizzamiglio, L., Guariglia, C., Cappa, S., Grossi, D., Luzzatti, C. (a cura di) (2019). *Manuale di neuropsicologia. Normalità e patologia dei processi cognitivi*. III edizione, Zanichelli editore, Bologna.
- D'Amore, B. (1999). *Elementi di Didattica della Matematica*, Pitagora Editrice, Bologna.
- Duval, R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine. Registres sémiotiques et apprentissages intellectuels*. Peter Lang AG, Berne (CH).
- Ericsson, K.A., Kintsch, W. (1995). Long-term working memory. *Psychological Review*, 107: 211-45.
- Fabbro, F. (2016). *Le neuroscienze: dalla fisiologia alla clinica*. Carocci editore, Roma.
- Fabbro, F. (2019). *Manuale di neuropsichiatria infantile. Una prospettiva psicoeducativa*. II edizione, Carocci editore, Roma.
- Fuster, J.M. (2002). Frontal lobes and cognitive development. *Journal of Neurocytology*, 31: 373-85.
- Gatti, D., Vecchi, T. (2020). *Che cos'è la memoria*. Carocci editore, Roma.
- Gazzaniga, M.S., Ivry, R.B., Mangun, G.R. (2015). *Neuroscienze cognitive*. Seconda edizione italiana condotta sulla quarta edizione americana, Zanichelli editore, Bologna.
- Girelli, L. (2006). *Noi e i numeri*. Società editrice il Mulino, Bologna.

- Gray, P. (2012). *Psicologia*. Terza edizione italiana condotta sulla sesta edizione americana, Zanichelli editore, Bologna.
- Grossi, D., Trojano, L. (2013). *Neuropsicologia dei lobi frontali. Sindromi disesecutive e disturbi del comportamento*. Seconda edizione, Società editrice il Mulino, Bologna.
- Guerini, R., Marraffa, M. (a cura di) (2019). *Psicopatologia e scienze della mente. Dalla psichiatria organicista alla neuroscienza cognitiva clinica*. Carocci editore, Roma.
- Guyton, A.C. (1996). *Neuroscienze. Basi di neuroanatomia e neurofisiologia*. II edizione, Piccin Nuova Libreria, Padova.
- Houdé, O., Kayser, D., Koenig, O., Proust, J., Rastier, F. (2000). *Dizionario di scienze cognitive. Neuroscienze, psicologia, intelligenza artificiale, linguistica, filosofia*. Editori Riuniti, Roma.
- Kandel, E.R. (2007). *Psichiatria, psicoanalisi e nuova biologia della mente*. Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Kandel, E.R. (2012). *L'età dell'inconscio. Arte, mente e cervello dalla grande Vienna ai nostri giorni*. Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Kwon, H., Reiss, A.L., Menon, V. (2002). Neural basis of protracted developmental changes in visuo-spatial working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 (20): 13336-13341.
- Làdavvas, E., Berti, A. (2020). *Neuropsicologia*. Quarta edizione, Società editrice il Mulino, Bologna.
- LeDoux, J. (2020). *Lunga storia di noi stessi. Come il cervello è diventato cosciente*. Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Legrenzi, P., Umiltà, C. (2016). *Una cosa alla volta. Le regole dell'attenzione*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Lindzey, G., Hall, C.S., Thompson, R.F. (1977). *Psicologia*. Nicola Zanichelli Editore, Bologna.
- Longoni, A.M. (2000). *La memoria*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Macchi Cassia, V., Valenza, E., Simion, F. (2012). *Lo sviluppo della mente umana. Dalle teorie classiche ai nuovi orientamenti*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Mammarella I.C., Cardillo, R., Caviola, S. (2019). *La memoria di lavoro nei disturbi del neurosviluppo. Dalle evidenze scientifiche alle applicazioni cliniche ed educative*. FrancoAngeli, Milano.
- Mangini, E. (2003). *Lezioni sul pensiero post-freudiano. Maestri, idee, suggestioni e fermenti della psicoanalisi del Novecento*. LED-Edizioni Universitarie di Lettere Economia Diritto, Milano.
- Marini, A. (2016). *Che cosa sono le neuroscienze cognitive*. Carocci editore, Roma.
- Matthews, G.G. (1999). *Neurobiologia. Molecole, cellule e sistemi*. Piccin Nuova Libreria, Padova.
- Mecacci, L. (1992). *Storia della psicologia del Novecento*. Editori Laterza, Roma-Bari.
- Miller, P.H. (1994). *Teorie dello sviluppo psicologico*. Nuova edizione, Società editrice il Mulino, Bologna.
- Nagel, B.J., Herting, M.M., Maxwell, E.C., Bruno, R., Fair, D. (2013). Hemispheric lateralization of verbal and spatial working memory during adolescence. *Brain and Cognition*, 82 (1): 58-68.
- Newman, S.D., Carpenter, P.A., Varma, S., Just, M.A. (2003). Frontal and parietal participation in problem-solving in the Tower of London: fMRI and computational modeling of planning and high-level perception. *Neuropsychologia*, 41: 1668-82.
- Nicoletti, R., Làdavvas, E., Tabossi, P. (a cura di) (2008). *Attenzione e cognizione. Festschrift in onore di Carlo Umiltà*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Nishida, M., Korzeniewska, A., Crone, N.E., Toyoda, G., Nakai, Y., Ofen, N., Brown, E.C., Asano, E. (2017). Brain network dynamics in the human articulatory loop. *Clinical Neurophysiology*, 128 (8): 1473-87.
- Nolen-Hoeksema, S., Fredrickson, B.L., Loftus, G.R., Lutz, C. (2017). *Atkinson & Hilgard's Introduzione alla psicologia*. XVI edizione, Piccin Nuova Libreria, Padova.
- Oliverio, A. (1982). *Biologia e comportamento*. Nicola Zanichelli Editore, Bologna.
- Oliverio, A. (2011). *Prima lezione di neuroscienze*. Editori Laterza, Roma-Bari.

- Oliverio, A. (2012). *Cervello*. Bollati Boringhieri editore, Torino.
- Oliverio, A. (2013). *Immaginazione e memoria. Fantasia e realtà nei processi mentali*. Mondadori Education, Milano.
- Oliverio, A. (2017). *Il cervello che impara. Neuropedagogia dall'infanzia alla vecchiaia*. Giunti O.S. Psychometrics, Firenze.
- Paivio, A. (1986). *Mental Representations. A Dual Coding Approach*. At the Clarendon Press, Oxford (UK).
- Paivio, A. (2014). Intelligence, dual coding theory, and the brain. *Intelligence*, 47: 141-58.
- Papagno, C. (2003). *Come funziona la memoria*. Editori Laterza, Roma-Bari.
- Papagno, C. (2010). *Neuropsicologia della memoria*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Pinel, J.P.J., Barnes, S.J. (2018). *Psicobiologia*. X edizione a cura di A. Facoetti, M. Ferrara, P. Marangolo, T. Pizzorusso, Edizioni EDRA, Milano.
- Purves, D., Cabeza, R., Huettel, S.A., LaBar, K.S., Platt, M.L., Woldorff, M.G. (2015). *Neuroscienze cognitive*. II edizione, Zanichelli editore, Bologna.
- Regni, R., Fogassi, L. (2019). *Maria Montessori e le neuroscienze. Cervello, mente, educazione*. Fefè Editore, Roma.
- Rivoltella, P.C. (2012). *Neurodidattica. Insegnare al cervello che apprende*. Raffaello Cortina Editore, Milano.
- Sbaragli, S. (2005). L'importanza delle diverse rappresentazioni semiotiche. Il caso degli enti primitivi della geometria. *Bollettino dei docenti di matematica*, 50: 69-76.
- Soyuhos, O., Baldauf, D. (2023). Functional connectivity fingerprints of the frontal eye field and inferior frontal junction suggest spatial versus nonspatial processing in the prefrontal cortex. *European Journal of Neuroscience*, 57 (7): 1114-1140.
- Surian, L. (2009). *Lo sviluppo cognitivo*. Editori Laterza, Roma-Bari.
- Taylor, L. (2007). *Lo sviluppo cognitivo*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Thomä, H., Kächele, H. (1990-93). *Trattato di terapia psicoanalitica*. 2 voll., Bollati Boringhieri editore, Torino.
- Trisciuzzi, L., Billi, C. (2004). *La formazione del sé. Itinerari psicopedagogici*. Edizioni ETS, Pisa.
- Trisciuzzi, L., Fratini, C., Galanti, M.A. (2004). *Introduzione alla pedagogia speciale*. II edizione, Editori Laterza, Roma-Bari.
- Valenza, E., Turati, C. (a cura di) (2019). *Promuovere lo sviluppo della mente. Un approccio neurocostruttivista*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Wager, T.D., Smith, E.E. (2003). Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis. *Cognitive, Affective and Behavioral Neuroscience*, 3 (4): 255-74.
- Wagner, H., Silber, K. (2006). *Psicologia fisiologica*. Società editrice il Mulino, Bologna.
- Walter, H., Bretschneider, V., Grön, G., Zurowski, B., Wunderlich, A.P., Tomczak, R., Spitzer, M. (2003). Evidence for quantitative domain dominance for verbal and spatial working memory in frontal and parietal cortex. *Cortex*, 39 (4-5): 897-911.
- Wang, L., Li, M., Yang, T., Wang, L., Zhou, X. (2022). Mathematics Meets Science in the Brain. *Cerebral Cortex*, 32: 123-36.
- Zago, L., Petit, L., Turbelin, M.R., Andersson, F., Vigneau, M., Tzourio-Mazoyer, N. (2008). How verbal and spatial manipulation networks contribute to calculation: an fMRI study. *Neuropsychologia*, 46 (9): 2403-14.