Università di Foggia

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ENNA "KORE"

Corso di Dottorato in
Learning Sciences and Digital Technologies
XXXVIII ciclo

EduTech-STEM: ambienti virtuali e dispositivi tecnologici per facilitare l'apprendimento delle discipline STEM

Tutor
Ch.ma Prof.ssa Marinella Muscarà

Co-tutor
Ch.ma Prof.ssa Antonella Valenti

Dottorando
Antonino Lizio

Anno Accademico 2024/2025

Abstract

Il presente lavoro si inserisce nel dibattito contemporaneo sull'innovazione didattica nelle discipline STEM ed è volto ad indagare il potenziale formativo degli ambienti immersivi di realtà virtuale (VR) nei processi di apprendimento di alcuni specifici contenuti di chimica nella scuola secondaria di secondo grado. L'indagine ha coinvolto una classe prima di un ITI, indirizzo Chimica e Materiali, e ha previsto l'utilizzo del visore Pico 4 come tecnologia di supporto per esplorare, in modo controllato, il rapporto tra esperienza immersiva, comprensione concettuale, vissuti emotivi e dinamiche motivazionali degli studenti.

Il quadro teorico di riferimento ha integrato contributi della psicologia della motivazione, della scienza dell'apprendimento e dell'*educational technology*, con particolare attenzione alle implicazioni cognitive ed emotive della presenza immersiva e dell'*engagement* situato. Tale cornice ha permesso di considerare la VR non soltanto come strumento tecnico ma anche come ambiente generativo di esperienza, in grado di facilitare processi di significazione e sostenere forme di partecipazione attiva.

Dal punto di vista metodologico, la ricerca ha adottato un disegno *mixed methods* sequenziale esplicativo, articolato in una prima fase quantitativa, che ha previsto la somministrazione dei questionari AMOS e PANAS ed una seconda fase qualitativa basata sul *focus group*.

I risultati emersi delineano un quadro coerente con l'attuale letteratura di riferimento, l'esperienza immersiva non modifica in modo improvviso le dimensioni motivazionali ma incide sui processi intermedi che mediano l'apprendimento e l'attenzione.

Il presente lavoro mostra come la VR possa configurarsi un dispositivo didattico ad alto potenziale trasformativo, a condizione che venga inscritta in una progettualità intenzionale, riflessiva e pedagogicamente fondata. La tecnologia, in questa prospettiva, non sostituisce i processi educativi, ma li amplifica e li rende più accessibili, offrendo nuove possibilità per promuovere la comprensione disciplinare e la partecipazione attiva nell'ambito dell'educazione delle discipline STEM.

Indice

Abstract 2
Introduzione 7
CAPITOLO I - Quadro teorico e stato dell'arte
I.1. Il contesto STEM 11
I.1.1 Le discipline STEM: definizione e importanza nel curricolo scolastico 12
I.1.2 Sfide e opportunità nell'insegnamento delle STEM 13
I.1.3 Innovazione metodologica e tecnologie. *Blended learning*, *problem posing*, metacognizione 16
I.1.4 Il ruolo della motivazione nelle discipline scientifiche. Attitudini e percezione della difficoltà 18
I.2. La realtà virtuale come tecnologia educativa 21
I.2.1 Definizione di realtà virtuale (VR), realtà aumentata (AR) e realtà mista (MR) 22
I.2.2 Tecnologie immersive e interattive: panoramica dei dispositivi e ambienti 25
I.2.2.1 Classificazione e struttura dei dispositivi immersivi .. 28
I.2.2.2 Ambienti immersivi e interattività: verso una didattica aumentata 29
I.2.2.3 Considerazioni critiche e implicazioni pedagogiche... 30
I.2.3 VR nella didattica: vantaggi e limiti percepiti 31
I.2.4 Applicazioni della VR nell'educazione 36
I.2.4.1 Apprendimento esperienziale 37
I.2.4.2 Coinvolgimento attivo e senso di presenza 38
I.2.5 Studi recenti sull'uso della VR nelle discipline STEM: evidenze empiriche 39
I.2.5.1 Approcci metodologici usati 45
I.3. Emozioni e apprendimento 50
I.3.1 Il ruolo delle emozioni nei processi cognitivi e motivazionali. 51
I.3.1.1 Teorie di riferimento 52
I.3.2 Emozioni positive, attenzione e memoria 61

I.3.2.1 Emozioni positive e processi cognitivi: un'interdipendenza complessa 62
I.3.2.2 Impatto su motivazione intrinseca/estrinseca 66
I.3.3 Ambienti digitali e regolazione emotiva. Come la VR influenza le emozioni (immersività e senso di *agency*)..... 70
I.3.4 Implicazioni educative delle emozioni nelle tecnologie immersive. Intenzionalità didattica, *engagement* e senso di appartenenza 74
CAPITOLO II - Cornice Metodologica
II.1. Obiettivi e Ipotesi di ricerca.....77
II.1.1 Approccio metodologico generale: paradigma interpretativo e approccio quasi-sperimentale 78
II.1.2 Struttura della ricerca *mixed methods*: triangolazione tra dati qualitativi e quantitativi 79
II.1.3 Finalità esplorativa e valutativa.....81
II.1.4 Limiti metodologici e validità ecologica 82
II.2 Contesto della sperimentazione e profilo dei partecipanti: La scuola IIS "Maiorana-Cascino" 83
II.2.1 Il gruppo classe: caratteristiche, dinamiche e predisposizioni 84
II.2.2 Ruolo degli insegnanti e co-progettazione didattica..... 85
II.3 Ambienti e strumenti della rilevazione empirica..... 86
II.3.1 Strumenti quantitativi: AMOS e motivazione, PANAS ed emozioni, Griglia per osservazione sistematica e valutazione degli apprendimenti. 87
II.3.2 Strumenti qualitativi: il *focus group*..... 88
II.4 Strutturazione del percorso didattico-sperimentale. Descrizione analitica delle 10 sessioni..... 89
CAPITOLO III - Analisi e interpretazione dei dati
III.1 AMOS - Abilità e Motivazione allo Studio 94
III.1.1 Analisi integrata delle variazioni individuali e dei profili motivazionali 99
III.1.2 Analisi delle variazioni individuali (Δ T2 – T1)..... 99

III.1.3 Correlazioni tra le variazioni 100
III.1.4 Clusterizzazione dei profili motivazionali 101
III.1.5 Confronto con le variabili anagrafiche e di rendimento ...102
III.1.6 Visualizzazione evolutiva dei profili individuali 103
III.1.7 Variazioni motivazionali e percezione di sé: l'effetto trasformativo della realtà immersiva (H1).....104
III.2 Analisi della misura di *self-report* Panas 106
III.2.1 Struttura e articolazione dei dati.....107
III.2.2 Esiti descrittivi e andamento generale delle emozioni.....107
III.2.3 Evidenze statisticamente significative 108
III.2.4 Profili evolutivi individuali 109
III.2.5 Rappresentazioni grafiche e interpretazioni visuali.....109
III.2.6 Implicazioni pedagogiche e conclusioni interpretative.... 112
III.3 Correlazioni tra variazioni emozionali (PANAS) e profili motivazionali (AMOS)..... 113
III.3.1 Configurazione e logica dell'analisi 113
III.3.2 Esiti principali dell'analisi correlazionale..... 114
III.3.3 Considerazioni interpretative 115
III.3.4 Implicazioni per la progettazione educativa..... 116
III.3.5 Variazioni emozionali (PANAS) e rendimento scolastico 116
III.3.6 Analisi differenziale per gruppi di rendimento 118
III.3.7 Emozioni disforiche e differenziazioni per profilo motivazionale (H2)..... 119
III.3.8 Differenze di genere nella variazione emozionale..... 121
III.3.9 Implicazioni educative e prospettive di sviluppo 122
III.4 Analisi osservativa del percorso didattico: articolazione per dimensioni progettuali.....123
III.4.1 Triangolazione integrata: osservazioni didattiche, emozioni e motivazione.....126
III.4.2 Dati PANAS: dissonanza tra coinvolgimento e benessere emotivo 127
III.4.3 Dati AMOS: rafforzamento della *self-perception* e apertura al cambiamento 129

III.5 Il *focus group* 131
III.5.1 Analisi tematica del *focus group* 131
III.5.2 Approfondimento tematico per contenuto e grado di partecipazione 134
III.6 Interpretazione dei risultati: una lettura triangolata tra vissuti, emozioni e motivazioni 137
III.6.1 Motivazione scolastica e *agency* percepita: convergenze tra AMOS e temi narrativi 138
III.6.2 Emozioni positive e disforiche: lettura affettiva integrata dei dati PANAS 139
III.6.4 Il *focus group* come chiave ermeneutica del dato numerico 141
III.7 La VR come facilitatore cognitivo: impatto sui risultati di apprendimento disciplinare (H3) 141
CAPITOLO IV - Discussione
IV.1 Cornice interpretativa: tra immersione cognitiva, *agency* epistemica e regolazione affettiva 144
IV.2 Motivazione, *agency* e percezione del sé nello spazio immersivo (discussione AMOS) 148
IV.3 Regolazione affettiva, emozioni epistemiche e vissuto immersivo (discussione PANAS) 150
IV.4 Tra osservazione e narrazione: la tridimensionalità del comportamento didattico 153
IV.5 Verso un modello integrato: condizioni e limiti nei contesti VR-STEM 156
IV.6 Limiti dello studio 158
IV.7 Ipotesi di sviluppo 161
Conclusioni 163
Bibliografia 170
Allegati 185
Ringraziamenti 203

Introduzione

Nel contesto contemporaneo, attraversato da transizioni culturali e tecnologiche sempre più rapide, la scuola è oggi sollecitata a ripensare i propri paradigmi di riferimento, tanto sul piano epistemologico quanto su quello metodologico, in modo particolare nell'insegnamento delle discipline STEM (*Science, Technology, Engineering and Mathematics*). L'esigenza di riconfigurare gli ambienti di apprendimento in chiave inclusiva, motivante e significativa risulta ormai ineludibile, tanto sul piano normativo quanto su quello pedagogico. Le tecnologie immersive, e in particolare la realtà virtuale (VR), si propongono come strumenti potenzialmente capaci di attivare tale trasformazione, agendo non solo sulla forma dell'esperienza didattica, ma anche sulla struttura delle disposizioni soggettive che ne regolano l'efficacia, ovvero la motivazione, le emozioni, il coinvolgimento e *l'agency*.

All'interno di questo scenario di profonda trasformazione educativa, il presente lavoro di ricerca si propone di indagare l'impatto dell'utilizzo della realtà virtuale in un contesto STEM, nello specifico, in un modulo curricolare di chimica, sulla motivazione e sul vissuto emozionale degli studenti. La finalità non è quella di validare un'innovazione strumentale, ma di interrogare le condizioni di possibilità dell'apprendimento all'interno di un ambiente tecnologicamente potenziato, assumendo una prospettiva pedagogica che integra dimensione cognitiva, affettiva e relazionale.

La cornice normativa e culturale di riferimento è ampia e articolata. A livello nazionale, le Linee guida STEM (MIM, 2023) e il PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza) Istruzione hanno delineato un quadro d'azione che invita esplicitamente le istituzioni scolastiche a "progettare ambienti di apprendimento innovativi e orientati alla personalizzazione", incoraggiando l'adozione di tecnologie digitali avanzate come strumenti per promuovere equità, partecipazione e successo formativo. In questa prospettiva, la realtà virtuale si configura come un mediatore del

cambiamento, capace di trasformare lo studente da destinatario passivo a protagonista nella costruzione del significato.

Sul piano teorico, il presente lavoro si radica su un impianto che considera la motivazione come un costrutto plastico e multidimensionale, che si struttura in relazione a fattori ambientali, relazionali ed esperienziali. Non si tratta, dunque, di rilevare livelli motivazionali considerati come dati stabili, ma di osservare come essi si modifichino in funzione dell'esperienza, delle interazioni didattiche, e della configurazione dell'ambiente. In particolare, l'ipotesi è che la realtà immersiva, proprio per la sua capacità di coinvolgere simultaneamente più canali percettivi e di posizionare lo studente al centro dell'azione, possa generare forme nuove di attivazione intenzionale, in cui emozione e cognizione operano sinergicamente.

La letteratura recente sul tema, come ampiamente discusso nel Capitolo 1, ha posto in luce come le emozioni positive facilitino l'apprendimento in quanto "attivano processi cognitivi più complessi, incrementano la capacità di attenzione selettiva e sostengono l'autoregolazione" (Fredrickson, 2001, cit. in I.3.2). In tale prospettiva, l'emozione non è un epifenomeno ma una componente strutturale dell'atto educativo, capace di orientare l'impegno cognitivo, modellare l'identità apprenditiva e influenzare la qualità dell'*engagement*. È in questo spazio teorico che si colloca l'interesse per l'ambiente VR, considerato non come contesto neutro, ma come dispositivo in grado di sollecitare una partecipazione epistemica incarnata.

L'ambiente immersivo consente allo studente di collocarsi dentro l'azione, nel tempo e nello spazio, come soggetto protagonista e non spettatore passivo. Questo cambiamento di prospettiva non è soltanto simbolico, ma coinvolge anche le dimensioni cognitive e affettive. Attraverso una rinnovata percezione spaziale e corporea dell'esperienza di apprendimento, la VR ridefinisce il modo in cui lo studente si percepisce in rapporto al sapere e alla propria capacità di apprendere. La ricerca intende allora esplorare se e come tale trasformazione si rifletta su indicatori misurabili di motivazione, coinvolgimento e attivazione emotiva.

Gli obiettivi generali della ricerca si articolano attorno a tre direttrici fondamentali, tra loro interconnesse. In primo luogo, si è inteso osservare

se e in che misura l'utilizzo della realtà virtuale all'interno di un contesto didattico STEM potesse incidere sui livelli di motivazione scolastica e negli orientamenti verso l'apprendimento, con particolare attenzione a dimensioni quali la percezione di autoefficacia, la teoria della personalità e gli obiettivi di padronanza. Un ulteriore asse di osservazione ha riguardato la sfera emozionale, con l'intento di rilevare le modificazioni affettive legate all'esperienza immersiva, sia in termini di attivazione positiva sia rispetto all'emersione di tensioni emozionali potenzialmente generative. Infine, un obiettivo trasversale ha riguardato l'integrazione dei dati quantitativi con elementi osservativi e qualitativi, al fine di costruire una lettura tridimensionale e situata del vissuto formativo.

A partire da tali obiettivi, sono state formulate tre ipotesi di ricerca, coerenti con il quadro teorico e metodologico adottato. La prima ipotesi (H1) sostiene che l'intervento didattico con tecnologia VR determini un miglioramento nei livelli di motivazione scolastica e nella fiducia personale degli studenti. La seconda ipotesi (H2) propone che l'ambiente immersivo sia in grado di sollecitare emozioni positive, come interesse, determinazione e orgoglio, funzionali ai processi di apprendimento ed inoltre riduca la frequenza e l'intensità di emozioni disforiche quali ansia, nervosismo e senso di inadeguatezza. Infine, l'ultima ipotesi (H3) concerne la sfera cognitiva ovvero, la realtà virtuale, in quanto ambiente multisensoriale ed esperienziale, lo si considera come fattore in grado di facilitare la comprensione dei concetti astratti della chimica, dal momento che essa li trasforma in rappresentazioni concrete e manipolabili.

Per indagare queste ipotesi, è stato adottato un disegno quasi-sperimentale a gruppo unico, articolato secondo una logica *mixed-methods* sequenziale esplicativo. Gli strumenti impiegati includono il questionario AMOS (Abilità e Motivazione allo Studio) per la valutazione della motivazione scolastica, il PANAS (*Positive and Negative Affect Schedule*) per la rilevazione delle variazioni emozionali, una griglia di osservazione sistematica e un *focus group* conclusivo. L'intervento si è svolto nell'arco di dieci incontri, durante i quali una classe prima di un ITI (Istituto Tecnico Industriale) ha svolto le attività didattiche di Chimica tramite visore VR su

contenuti disciplinari specifici (struttura atomica e bilanciamento delle reazioni).

La struttura della tesi si articola in quattro capitoli principali, più le conclusioni generali.

Il Capitolo I offre una disamina articolata del quadro teorico, normativo e pedagogico che costituisce lo sfondo della ricerca, soffermandosi sulle trasformazioni richieste all'insegnamento delle STEM, sul ruolo delle emozioni nell'apprendimento, e sul potenziale educativo delle tecnologie immersive.

Il Capitolo II presenta nel dettaglio il disegno metodologico, l'approccio, gli strumenti, i partecipanti, l'articolazione del percorso didattico e le modalità di raccolta e analisi dei dati.

Il Capitolo III illustra i risultati ottenuti, suddivisi in sezioni relative agli strumenti utilizzati, alle osservazioni sistematiche e ai dati qualitativi, restituendo un quadro ampio e coerente dei principali esiti dell'intervento.

Il Capitolo IV, infine, di natura interpretativa, rilegge criticamente i risultati alla luce della cornice teorica e degli obiettivi iniziali, mettendo in evidenza le coerenze, le tensioni e le implicazioni educative dei dati emersi.

A seguire, le Conclusioni offrono una sintesi dell'intero percorso di ricerca, esplicitano i limiti dello studio e formulano ipotesi di sviluppo per future indagini.

L'intento che ha guidato il lavoro non è stato quello di dimostrare l'efficacia della realtà virtuale in termini lineari, ma di esplorarne il potenziale trasformativo in chiave pedagogica. Attraverso un approccio metodologico integrato e una lettura teoricamente fondata, il presente lavoro intende inserirsi nel dibattito sulla significatività dell'apprendimento nelle STEM, proponendo una visione in cui la tecnologia diventa estensione del pensiero, capace di amplificarne le potenzialità e di dare forma a una didattica situata, emotivamente coinvolgente e cognitivamente generativa.

Capitolo I
Quadro teorico e stato dell'arte

I.1. Il contesto STEM

In un ecosistema educativo attraversato da mutamenti profondi di natura epistemologica, tecnologica e socio-culturale, il potenziamento delle discipline STEM non rappresenta soltanto una priorità strategica per le agende politiche internazionali, ma si configura come nodo critico per la ridefinizione della funzione formativa della scuola. A tale riguardo, le recenti direttive normative e i documenti di indirizzo istituzionale delineano un orizzonte pedagogico che, lungi dal limitarsi all'incremento di competenze tecnico-specialistiche, sollecita una ristrutturazione sistemica dei curricoli, delle metodologie didattiche e degli ambienti di apprendimento, secondo una logica integrata, inclusiva e trasformativa.

È in tale cornice che si inscrivono le tre direttrici analitiche approfondite nei paragrafi che seguono, concentrandosi dapprima sul riferimento normativo delineato dalle Linee guida STEM, dal Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e dagli obiettivi dell'Agenda 2030, nella prospettiva di una scuola che sia agente attivo di capacitazione, equità e sostenibilità. Ne segue un approfondimento sul potenziale delle metodologie innovative, evidenziando la loro natura non meramente strumentale, bensì profondamente trasformativa, in quanto capaci di attivare dispositivi formativi che intrecciano dimensione cognitiva, affettiva e simbolica.

Pertanto, l'intero capitolo si propone di delineare un'articolata cornice interpretativa che consenta di leggere la valorizzazione delle discipline STEM non come un'esigenza di natura esclusivamente funzionale o tecnica, ma come un passaggio necessario verso la costruzione di un sistema educativo orientato alla responsabilità, alla complessità e alla efficienza cognitiva. In tal senso, è opportuno sottolineare che non è sufficiente promuovere l'innovazione nei contenuti, bensì è necessario, piuttosto,

riformulare l'intenzionalità educativa nella sua interezza, affinché l'educazione scientifica diventi spazio di cittadinanza, emancipazione e co-costruzione di senso.

I.1.1 Le discipline STEM: definizione e importanza nel curricolo scolastico

Nel contesto delle trasformazioni socio-educative promosse a livello internazionale, appare necessario sottolineare come il potenziamento delle discipline STEM non possa essere interpretato esclusivamente come un adeguamento tecnico ai mutamenti del mercato del lavoro, bensì vada inscritto entro una più ampia cornice sistemica volta a riconfigurare la funzione stessa della scuola come agenzia formativa capace di intercettare, orientare e co-costruire l'accesso dei giovani alla cittadinanza cognitiva globale. A tale riguardo, le più recenti politiche educative promosse dall'Unione Europea e recepite nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) italiano configurano le STEM non soltanto come ambiti disciplinari prioritari, ma come vettori di un rinnovamento paradigmatico della progettazione curricolare (MIM, 2023).

In particolare, le Linee guida per le discipline STEM, emanate in attuazione dell'articolo 1, comma 552, della legge n. 197 del 29 dicembre 2022, riconoscono l'urgenza di rafforzare, sin dalla prima infanzia e lungo tutto l'arco dell'istruzione scolastica, lo sviluppo di competenze matematico-scientifico-tecnologiche e digitali attraverso l'integrazione di metodologie didattiche innovative, tra cui il *problem solving*, il lavoro collaborativo, il pensiero computazionale e la didattica laboratoriale (Ibidem). Tali orientamenti sono da intendersi come risposta sistemica a quanto segnalato dai dati nazionali e internazionali (PISA, TIMSS, INVALSI), che evidenziano persistenti disuguaglianze nell'acquisizione delle competenze STEM, con effetti differenziali in base al genere, al contesto socioeconomico e all'appartenenza territoriale (Roffi, 2022).

Va inoltre riconosciuto come la centralità attribuita all'educazione STEM si collochi all'interno di una cornice epistemologica più ampia, che

comprende la promozione dell'interdisciplinarietà tra le scienze umanistiche e artistiche, come proposto dal modello STEAM (*Science, Technology, Engineering, Arts and Mathematics*), nella prospettiva di un'educazione integrale e complessa (Cedefop & ReferNet, 2025). Il riferimento alla Raccomandazione del Consiglio dell'UE sulle competenze chiave per l'apprendimento permanente (2018) ribadisce il valore dell'approccio esperienziale e del metodo scientifico come dispositivi cognitivi capaci di promuovere autonomia di giudizio, capacità di analisi critica e *agency* trasformativa, a partire da una didattica che si interroga sul senso del conoscere e non solo sui suoi esiti misurabili.

Tale cornice normativa e culturale trova una significativa risonanza anche nell'Agenda 2030 dell'ONU, che all'interno dell'Obiettivo 4 individua tra i traguardi dell'istruzione di qualità l'acquisizione di competenze scientifiche e tecnico-professionali, la promozione della parità di genere e la riduzione delle disuguaglianze educative, specialmente a vantaggio delle categorie più vulnerabili (ONU, 2015). La convergenza tra le linee guida nazionali, le raccomandazioni europee e gli obiettivi globali configura dunque un orizzonte pedagogico che supera l'ottica strumentale delle tecnologie per convergere verso una visione formativa orientata alla competenza, alla sostenibilità e alla responsabilità collettiva.

In tal senso, l'integrazione delle discipline STEM nel curricolo scolastico non può essere concepita come mera introduzione di contenuti innovativi, bensì come operazione trasformativa dei processi educativi nella loro interezza, da cui discende la necessità di una formazione docente continua, riflessiva e situata, capace di coniugare sapere epistemico, sensibilità didattica e tensione etica verso l'inclusione e l'equità (Hughes et al., 2022).

I.1.2 Sfide e opportunità nell’insegnamento delle STEM

Nel delineare un quadro articolato delle attuali sfide e potenzialità che attraversano l'insegnamento delle discipline STEM, risulta imprescindibile collocare la riflessione entro una cornice sistemica che superi la logica addestrativa per approdare a una visione olistica e trasformativa del

processo formativo. Le discipline scientifico-tecnologiche, per loro stessa natura, sollecitano una revisione profonda del modello didattico tradizionale, non solo sul piano epistemologico, ma anche in relazione alla necessità di rinegoziare la funzione stessa dell'insegnamento all'interno di contesti educativi sempre più complessi, fluidi e digitalmente mediatizzati (MIM, 2023).

A tale riguardo, è opportuno evidenziare come la transizione verso un approccio integrato e inclusivo alle STEM implichi non soltanto l'introduzione di contenuti innovativi, ma una riformulazione radicale della cornice metodologica, orientata alla costruzione di ambienti di apprendimento dinamici, cooperativi e cognitivamente sfidanti. In particolare, l'approccio STEAM, nella sua declinazione più ampia che include le dimensioni estetico-creative e socio-affettive, si configura come risposta paradigmatica all'esigenza di coniugare il rigore scientifico con l'esperienza vissuta, promuovendo la capacità degli studenti di leggere criticamente la complessità del reale attraverso l'integrazione dei saperi (Gil-Quintana, Malvasi, Castillo-Abdul, & Romero-Rodríguez, 2020).

È necessario sottolineare che l'insegnamento delle STEM è frequentemente ostacolato da una serie di criticità sistemiche che vanno dalla resistenza al cambiamento da parte dei docenti, alla frammentazione disciplinare, fino all'insufficienza di una formazione iniziale e in servizio che sia realmente fondata su una epistemologia della complessità e della co-progettazione (Elías et al., 2022). Conseguentemente, non è sufficiente operare un aggiornamento tecnico-metodologico, bensì è necessario che l'intero impianto formativo sia ristrutturato secondo una logica generativa, in cui la professionalità docente si configuri come competenza riflessiva e relazionale, capace di attivare dispositivi formativi che coinvolgano attivamente gli studenti nei processi di indagine, scoperta e modellizzazione.

A tal proposito, le esperienze maturate in contesti di sperimentazione didattica con l'utilizzo di tecnologie immersive e intelligenze artificiali, come nel progetto RAISE (Robotics and AI for Socio-economic Empowerment), dimostrano la possibilità di attivare ambienti inclusivi e

personalizzati in cui l'interazione tra lo studente e un assistente virtuale favorisce l'acquisizione di competenze STEM unitamente allo sviluppo di abilità socio-emotive e comunicative (Hughes et al., 2022). In particolare, il ricorso a compagni virtuali adattivi, capaci di mediare la relazione educativa mediante *feedback* affettivi e supporti personalizzati, rappresenta una concreta opportunità per coinvolgere attivamente anche gli studenti con bisogni educativi speciali, superando i tradizionali vincoli di accessibilità e partecipazione. Tale approccio, lungi dall'essere riducibile a una semplice innovazione strumentale, configura una nuova ontologia pedagogica in cui la relazione con il sapere è mediata da artefatti cognitivi sensibili all'esperienza e ai bisogni dell'allievo (Drigas, Papanastasiou, & Skianis, 2023).

Inoltre, la valorizzazione delle tecnologie educative si inserisce in una cornice più ampia di re-immaginazione del ruolo della scuola nella società contemporanea, dove l'insegnamento delle STEM si confronta non solo con la necessità di preparare alle professioni del futuro, ma anche con il compito di formare cittadini consapevoli, capaci di esercitare un pensiero critico, etico e creativo nel rapporto con la scienza, la tecnica e l'innovazione. Come sottolineano le LINEE GUIDA PER LE DISCIPLINE STEM (MIM, 2023), l'approccio integrato si propone di sviluppare le cosiddette competenze 4C (*critical thinking, communication, collaboration, creativity*) all'interno di percorsi formativi che rendano gli studenti protagonisti attivi di un apprendimento significativo, contestualizzato e orientato alla soluzione di problemi autentici.

Tuttavia, è opportuno sottolineare che l'effettiva implementazione di un simile paradigma richiede la rimozione di ostacoli strutturali e culturali che ancora oggi limitano l'accesso e la partecipazione alle STEM, in particolare per le studentesse e per gli studenti provenienti da contesti socio-economicamente svantaggiati. La letteratura evidenzia come persistano stereotipi di genere, aspettative differenziali e barriere cognitive che condizionano in modo significativo le scelte educative e professionali dei giovani (Elías et al., 2022). A tal proposito, le politiche europee e internazionali insistono sulla necessità di promuovere un'educazione STEM

equa, inclusiva e *gender-sensitive*, fondata su pratiche didattiche trasformative e su un curricolo critico capace di decostruire i bias impliciti e di valorizzare la pluralità delle intelligenze e dei percorsi (MIM, 2023).

A partire da tali considerazioni, emerge con chiarezza che l'insegnamento delle STEM non può essere ricondotto a una semplice trasmissione di contenuti, ma va concepito come un laboratorio cognitivo e simbolico in cui si co-costruisce il significato dell'apprendere in contesti inediti, situati e digitalmente potenziati. In ultima istanza, ciò che si richiede ai sistemi formativi è la capacità di assumere una postura pedagogica orientata alla responsabilità e alla cura, affinché le STEM non diventino solo linguaggi specialistici, ma strumenti per la costruzione di una conoscenza tecnico-scientifica più equa e consapevole.

I.1.3 Innovazione metodologica e tecnologie. *Blended learning, problem posing e* metacognizione

La crescente complessità dei saperi e le trasformazioni epistemologiche che attraversano i paradigmi educativi contemporanei, portano a soffermarsi sul potenziale euristico e formativo delle metodologie innovative, intese non tanto come mere strategie didattiche alternative, quanto piuttosto come dispositivi cognitivi e simbolici capaci di ridefinire il rapporto tra soggetto, conoscenza e ambiente. In tal senso, l'approccio STEM, nella sua declinazione integrata con le tecnologie educative, si configura come una cornice interpretativa privilegiata volta ad indagare la plasticità cognitiva degli studenti e la possibilità di attivare processi di apprendimento situato, autentico e intenzionalmente progettato.

È opportuno evidenziare che il ricorso a modalità ibride, quali il *blended learning*, costituisce non soltanto una risposta funzionale alla necessità di ampliare i tempi e gli spazi dell'apprendimento, ma anche un contesto di sperimentazione metodologica in cui l'alternanza tra dimensione sincrona e asincrona favorisce una maggiore *agency* dello studente, inteso come soggetto intenzionale, riflessivo e situato (Ardianti, Sulisworo, Pramudya, & Raharjo, 2020). Tale approccio consente di implementare ambienti mediali

nei quali la conoscenza non è trasmessa linearmente, bensì co-costruita attraverso pratiche partecipative che valorizzano la dimensione laboratoriale, il *problem posing* e la negoziazione di significati all'interno di una comunità di studenti. Nondimeno, va riconosciuto come il successo di tali modelli sia subordinato alla presenza di una cornice pedagogica esplicita che sappia orientare il processo formativo verso obiettivi di cittadinanza e non meramente performativa.

In tale prospettiva, le tecnologie digitali non possono essere considerate semplici strumenti di supporto alla didattica, bensì veri e propri artefatti cognitivi che mediano e strutturano l'esperienza educativa. La riflessione proposta da Couso, Simarro & López-Simó (2020) evidenzia come l'uso intenzionale di strumenti digitali, quali simulatori, laboratori virtuali, dispositivi sensoriali e ambienti immersivi, rappresenti un'occasione per ripensare le pratiche scientifiche e matematiche in termini di processi autentici di *inquiry*, modelizzazione e pensiero computazionale. Conseguentemente, la didattica STEM si connota sempre più come uno spazio di transizione tra saperi disciplinari e competenze metacognitive, in cui lo studente è chiamato a svolgere un ruolo attivo di esploratore del sapere, in un movimento costante tra astratto e concreto, tra teoria e prassi, tra individuale e collettivo.

Tuttavia, è opportuno sottolineare che l'innovazione metodologica non si esaurisce nella dimensione tecnico-procedurale, ma implica una ridefinizione dell'intero *frame* educativo in senso relazionale, inclusivo e trasformativo. A tale riguardo, il contributo di Drigas et al. (2023) appare particolarmente significativo, in quanto pone l'accento sull'intreccio tra tecnologie emergenti, intelligenza emotiva e metacognizione quale asse portante di una "scuola del futuro" capace di coniugare l'evoluzione tecnologica con la centralità del soggetto in apprendimento. In questa direzione, l'insegnante non è più inteso come semplice erogatore di contenuti, ma come mediatore simbolico e facilitatore di processi complessi, capace di attivare nei discenti competenze riflessive, regolative e socio-affettive. Il *setting* educativo si trasforma così in uno spazio dinamico e

modulare, permeabile alla differenza, aperto alla co-costruzione del sapere e sensibile alla dimensione emozionale dell'esperienza formativa.

In tal senso, non è sufficiente implementare ambienti tecnologici avanzati, bensì è necessario che tali ambienti siano progettati alla luce di una consapevolezza pedagogica che riconosca la centralità dell'esperienza vissuta e della relazione educativa. Le evidenze empiriche offerte da Huang, Ball, Cotten & O'Neal (2020), in questo contesto, rafforzano l'idea che il senso di autoefficacia tecnologica degli studenti, costruito attraverso esperienze dirette e l'osservazione di modelli significativi, costituisca un predittore rilevante dell'attitudine verso le discipline STEM, soprattutto in contesti di vulnerabilità socio-culturale. A tal proposito si evidenzia come l'interiorizzazione di un'immagine positiva delle proprie competenze digitali agisca come leva motivazionale, incidendo in maniera determinante sulla partecipazione attiva e sull'orientamento professionale futuro degli studenti.

Pertanto, le metodologie innovative, nella loro accezione più ampia, rappresentano non solo un'alternativa didattica, ma una vera e propria direttrice epistemica e pedagogica che interpella il sistema educativo nella sua interezza. Esse sollecitano una riflessione strutturale sull'intenzionalità formativa, sull'organizzazione degli ambienti di apprendimento, sulla ridefinizione dei ruoli educativi e sulla valorizzazione dell'alterità come risorsa. In ultima istanza, è nella capacità di connettere sfera cognitiva, dimensione simbolica e affettiva, *frame* valoriale e strumenti tecnologici che si gioca la reale innovatività delle pratiche educative del nostro tempo.

I.1.4 Il ruolo della motivazione nelle discipline scientifiche. Attitudini e percezione della difficoltà

Sin dalla sua prima formulazione concettuale nel 2001, l'acronimo STEM ha progressivamente acquisito una centralità paradigmatica nelle politiche educative internazionali, configurandosi come dispositivo epistemologico atto a promuovere una visione integrata e sistemica delle discipline scientifico-tecnologiche. Tuttavia, è necessario sottolineare come,

nonostante l'ampia diffusione e l'evidente attrattività pedagogica del modello, la nozione stessa di "modello STEM integrato" continui a presentare qualche ambiguità applicativa che ne compromettono, talvolta, l'efficacia sul piano curricolare (Niewint-Gori, 2023).

A tal proposito si evidenzia che le interpretazioni prevalenti del concetto di integrazione STEM si muovono lungo un continuum che va dalla mera giustapposizione tematica tra le discipline, alla costruzione di percorsi inter- o transdisciplinari capaci di interconnettere organicamente contenuti, pratiche e contesti (Mafarja, Mohamad, & Zulnaidi, 2024). In tal senso, la sfida educativa non si limita alla compresenza di più ambiti disciplinari, ma implica, più radicalmente, la ristrutturazione dell'esperienza didattica attraverso attività basate su problemi reali, contestualizzati in scenari eticamente, socialmente e culturalmente significativi (Niewint-Gori, 2023).

È opportuno evidenziare che, in molteplici casi, l'insegnamento STEM integrato si declina in attività progettuali che pongono l'accento su una didattica centrata sullo studente, in cui l'indagine, la collaborazione e la riflessione critica diventano pratiche fondanti. Le attività di *design-based learning*, ad esempio, promuovono processi di *problem solving* nei quali la dimensione tecnica si intreccia in modo inscindibile con la riflessione etica, l'empatia e l'attenzione ai vincoli e alle condizioni contestuali (Mafarja et al., 2024; Montero-Izquierdo, Jeong, & González-Gómez, 2024).

Nondimeno, l'integrazione disciplinare richiede una progettazione consapevole e intenzionale, in grado di rendere condivisibili con gli studenti i nessi tra concetti, linguaggi e metodologie propri delle diverse aree del sapere. Gli insegnanti, in tale prospettiva, assumono il ruolo di facilitatori, e guidano la costruzione di significati attraverso l'uso di rappresentazioni interdisciplinari, domande orientative e strumenti digitali didatticamente significativi.

Inoltre, l'adozione di compiti autentici legati a problematiche del mondo reale favorisce un orientamento didattico in grado di rafforzare l'identità STEM degli studenti, sostenendone la motivazione, la partecipazione e l'orientamento professionale. Tale impostazione, peraltro, consente di

valorizzare la dimensione inclusiva dell'insegnamento, ponendo attenzione ai fattori di genere, etnia e background socio-culturale, affinché ciascun discente possa riconoscersi nei percorsi proposti.

A tale riguardo, le caratteristiche dell'insegnamento STEM integrato, quali la progettualità collaborativa, l'interdisciplinarità contestualizzata, l'apertura a soluzioni multiple, l'uso intenzionale delle tecnologie, l'analisi critica dei vincoli reali, si configurano come leve potenti per lo sviluppo delle competenze del XXI secolo, in particolare quelle afferenti al pensiero critico, alla creatività, alla comunicazione e alla collaborazione (Ryan, 2013; Montero-Izquierdo et al., 2024). Lavorare in piccoli gruppi, con compiti autentici e problemi aperti, consente infatti di stimolare l'argomentazione, il confronto tra pari e la metariflessione.

In questo quadro, diventa strategico il riferimento a metodologie didattiche cooperative, come quelle basate sull'Internet *Reciprocal Teaching* (IRT), capaci di integrare il dialogo, la negoziazione di significati e l'uso di strumenti digitali per favorire una comprensione profonda dei contenuti STEM (Mafarja et al., 2024). L'evidenza empirica, in tal senso, suggerisce che l'adozione dell'IRT in ambienti collaborativi promuove una più solida alfabetizzazione scientifica e una più positiva attitudine nei confronti delle discipline STEM, rafforzando tanto la dimensione cognitiva quanto quella affettivo-motivazionale dell'apprendimento.

Tuttavia, è opportuno sottolineare che l'integrazione delle discipline non può essere concepita come un sostituto della profondità concettuale delle singole aree, bensì come una modalità complementare che va attivata con discernimento, in funzione della natura dei contenuti e degli obiettivi formativi perseguiti (Ryan, 2013). Non è sufficiente, pertanto, aggregare contenuti eterogenei, è necessario che la costruzione curricolare sia orientata da una chiara intenzionalità pedagogica e da una profonda consapevolezza epistemologica (Roffi, 2022).

In conclusione, l'insegnamento delle discipline STEM rappresenta una prospettiva feconda ma complessa, che richiede un ripensamento radicale delle pratiche didattiche, delle strategie valutative e delle logiche curricolari. Per sostenere questa transizione, risulta cruciale il supporto formativo agli

insegnanti, l'adozione di modelli già sperimentati, come i percorsi proposti dal progetto europeo STE(A)M-IT, e un costante monitoraggio delle ricadute educative di tali approcci innovativi (Tasiopoulou et al., 2022). Solo in questo modo sarà possibile valorizzare il potenziale trasformativo della didattica STEM, coniugando rigore disciplinare, apertura interdisciplinare e sensibilità pedagogica.

I.2. La realtà virtuale come tecnologia educativa

Nell'attuale scenario della trasformazione digitale dei contesti formativi, la realtà virtuale (VR) si configura non soltanto come un'evoluzione tecnologica, ma come un'autentica riconfigurazione epistemologica e pedagogica. In essa convergono dimensioni sensoriali, cognitive ed emozionali, che permettono di superare la dicotomia tradizionale tra teoria e prassi, tra conoscenza astratta e esperienza pratica, aprendo a modalità di apprendimento radicalmente nuove. L'ambiente virtuale, infatti, si presenta come un costrutto semiotico denso, al cui interno l'apprendente è immerso in un contesto tridimensionale interattivo che stimola l'azione, sollecita il pensiero riflessivo e promuove l'engagement attraverso un coinvolgimento multisensoriale (Muscarà, Romano, Lizio, & Carnazzo, 2024; Gui et al., 2023).

In tale prospettiva, la VR non va intesa come semplice dispositivo strumentale o supporto accessorio all'insegnamento, bensì come una tecnologia ad alta intenzionalità educativa, capace di modulare la rappresentazione del reale e di incidere sui processi di significazione e interiorizzazione del sapere. La sua efficacia, tuttavia, non risiede esclusivamente nell'impatto percettivo dell'ambiente simulato, quanto piuttosto nella possibilità di progettare percorsi di apprendimento situati, contestualizzati e coerenti con i bisogni epistemici, emotivi e relazionali dei discenti (Radianti, Majchrzak, Fromm, & Wohlgenannt, 2020; Pellas, Dengel, & Christopoulos, 2020). La VR, in tal senso, diviene medium pedagogico attraverso il quale si può potenziare la metacognizione,

sviluppare la consapevolezza situata e attivare processi di costruzione condivisa del significato.

Numerose ricerche convergono nell'evidenziare come l'adozione di ambienti immersivi consenta di attivare dinamiche di apprendimento trasformativo, basato sull'interazione con artefatti digitali e sulla rielaborazione intersoggettiva dei contenuti. È proprio l'integrazione fra percezione, azione e riflessione a costituire il tratto distintivo dell'esperienza tramite realtà virtuale, la quale non si limita a trasmettere conoscenze, ma costruisce contesti d'azione in cui il sapere prende forma, senso e direzione (Elme, Jørgensen, Dandanell, Mottelson, & Makransky, 2022; Hamed & Aljanazrah, 2020).

Appare dunque urgente, in una prospettiva pedagogica complessa, assumere la VR non come elemento esterno alla didattica, ma come parte integrante di un ecosistema formativo che esige progettualità, intenzionalità e riflessività. Solo all'interno di un *framework* pedagogico fondato su criteri di inclusione, accessibilità e coerenza metodologica, la realtà virtuale può configurarsi come spazio di apprendimento autentico, critico e trasformativo, superando il rischio di una spettacolarizzazione dell'esperienza che impoverirebbe il valore educativo della tecnologia (Lee et al., 2024; Lege & Bonner, 2020).

I.2.1 Definizione di realtà virtuale (VR), realtà aumentata (AR) e realtà mista (MR)

Nel contesto della trasformazione dei paradigmi educativi in direzione di una maggiore interattività, immersività e personalizzazione dell'esperienza formativa, appare opportuno chiarire la cornice concettuale entro cui si collocano le principali tecnologie immersive attualmente impiegate nei contesti scolastici e accademici. È utile distinguere la realtà virtuale (VR), la realtà aumentata (AR) e la realtà mista (MR). Tali tecnologie, pur condividendo la finalità di arricchire l'esperienza cognitiva attraverso l'interazione uomo-macchina, si differenziano significativamente per grado

di immersività, modalità di integrazione tra elementi digitali e reali e implicazioni pedagogiche.

La realtà virtuale (VR) si configura come un ambiente tridimensionale generato digitalmente nel quale l'utente può muoversi, esplorare e interagire in modo immersivo, grazie all'utilizzo di dispositivi dedicati come visori, *haptic controller* e, talvolta, *motion tracking* avanzati (Radianti et al., 2020). L'esperienza della VR presuppone una sostanziale sospensione della percezione del mondo fisico e la sua sostituzione con uno spazio simulato, sensorialmente avvolgente, nel quale il soggetto assume un ruolo attivo e centrato. In tal senso, la VR si distingue per la sua capacità di creare ambienti esperienziali complessi, che sollecitano la partecipazione multimodale e l'attivazione simultanea di competenze cognitive, affettive e procedurali (Bogusevschi, Muntean, & Muntean, 2020).

La realtà aumentata (AR), invece, non sostituisce l'ambiente reale, ma lo arricchisce con elementi virtuali sovrapposti alla percezione del mondo fisico attraverso schermi, *tablet*, *smartphone* o visori trasparenti. L'AR permette, dunque, un'interazione simultanea con oggetti fisici e digitali, mantenendo costante il radicamento nel contesto situato (Li et al., 2022). A tale riguardo, va sottolineato che la AR si configura come tecnologia di mediazione cognitiva che potenzia l'apprendimento in contesti reali, consentendo l'accesso contestualizzato a dati, rappresentazioni e simulazioni che rinforzano la comprensione concettuale e promuovono la capacità di collegamento tra teoria e prassi (Geroimenko, 2020).

In posizione intermedia tra queste due dimensioni si colloca la realtà mista (MR), una tecnologia emergente che consente l'integrazione bidirezionale e dinamica tra oggetti virtuali e ambienti reali, al punto da rendere possibile la manipolazione simultanea e reciproca tra mondo fisico e digitale (Soroko, Soroko, Mukasheva, Montes, & Tkachenko, 2021). Secondo la letteratura più recente, la MR si caratterizza per la capacità di superare la dicotomia reale/virtuale, dando luogo a un continuum esperienziale che richiede al soggetto una rinegoziazione costante dei propri riferimenti spaziali, percettivi e simbolici (Tene et al., 2024).

Nondimeno, è opportuno evidenziare che la distinzione tra VR, AR e MR non è sempre netta dal punto di vista esperienziale, soprattutto in ambienti di apprendimento complessi dove le tecnologie si intrecciano in maniera sinergica. In questo senso, alcuni autori propongono il concetto di XR, ovvero *extended reality* come termine ombrello per designare l'intero spettro delle esperienze immersive, superando una categorizzazione rigida a favore di una visione più fluida e continua dell'interazione uomo-tecnologia (Elme et al., 2022).

Dal punto di vista pedagogico, le tre tecnologie condividono un potenziale trasformativo significativo in quanto artefatti cognitivi e simbolici capaci di riconfigurare l'ambiente di apprendimento in chiave situata, esperienziale e partecipativa (Cromley, Chen, & Lawrence, 2023). Tuttavia, esse comportano anche sfide rilevanti in termini di progettazione didattica, accessibilità, sostenibilità infrastrutturale e competenze richieste ai docenti (Hamilton, McKechnie, Edgerton, & Wilson, 2020). La scelta tra VR, AR e MR non può dunque essere guidata unicamente da criteri di innovatività tecnologica, ma deve fondarsi su una riflessione epistemologica e pedagogica esplicita circa gli obiettivi formativi, la natura dei contenuti, il profilo dei destinatari e il contesto d'uso

A tal proposito, alcuni studi sottolineano come la VR sia particolarmente efficace in contesti in cui è necessario simulare ambienti pericolosi, costosi o inaccessibili (Danmali, Onansanya, Atanda, & Abdullahi, 2024), mentre l'AR risulta preferibile in situazioni che richiedono un'integrazione contestuale dell'informazione o un supporto alla realtà operativa, come nel caso di laboratori scientifici o visite guidate aumentate (Campos, Hidrogo, & Zavala, 2022). La MR, infine, apre scenari ancora poco esplorati ma promettenti, nei quali l'apprendimento si realizza attraverso processi di co-costruzione mediata, manipolazione attiva e convergenza sensoriale (Flegr, Kuhn, & Scheiter, 2023).

In sintesi, la definizione di VR, AR e MR, pur ancorata a specifiche caratteristiche tecnologiche e funzionali, va letta all'interno di una più ampia cornice educativa che interroga il significato dell'esperienza formativa, la sua dimensione corporea e relazionale, nonché la capacità di

tali dispositivi di attivare posture epistemiche complesse e riflessive. In tal senso, è auspicabile che il dibattito scientifico si orienti verso una sempre maggiore integrazione tra analisi tecnica, prospettiva pedagogica e riflessione critica sulla relazione tra soggetto, conoscenza e tecnologie.

I.2.2 Tecnologie immersive e interattive: panoramica dei dispositivi e ambienti

Le tecnologie immersive si configurano non solo come strumenti innovativi a supporto dell'insegnamento, ma come autentiche piattaforme ontologiche in grado di ridefinire il concetto stesso di esperienza educativa. La realtà virtuale, la realtà aumentata e la realtà mista, rappresentano, in tal senso, declinazioni multiple di una medesima tensione verso l'ibridazione dei piani sensoriale, cognitivo ed emozionale, dando luogo ad ambienti simbolico-cognitivi nei quali l'apprendimento si radica in modalità esperienziali altamente coinvolgenti e personalizzabili (Pellas et al., 2020).

Tali tecnologie devono essere comprese all'interno di una cornice pedagogica che valorizzi la natura partecipativa, trasformativa e situata della conoscenza. La distinzione tra VR immersiva, semi-immersiva e non immersiva consente di cogliere la complessità del rapporto che intercorre tra grado di coinvolgimento sensoriale e qualità dell'esperienza formativa. La VR immersiva, attraverso visori *head-mounted display* (HMD) e tracciamento tridimensionale del movimento, offre ambienti simulati nei quali l'utente percepisce una presenza plausibile, spesso più intensa di quella generata da contesti didattici convenzionali (Hamilton et al., 2020; Elme et al., 2022).

Parallelamente, le tecnologie AR e MR amplificano la dimensione del reale mediante la sovrapposizione e l'integrazione di elementi digitali nello spazio fisico, permettendo di co-costruire ambienti di apprendimento aumentati, dinamici e contestualizzati (Radianti et al., 2020; Li et al., 2022). La realtà aumentata, infatti, si presta a una valorizzazione del contesto reale come sfondo attivo del processo formativo, mentre la realtà mista prefigura ambienti educativi in cui le barriere tra reale e virtuale si dissolvono in una

continuità cognitiva e sensoriale, sollecitando nuove forme di *agency* dell'apprendente e una riflessione critica sulla materialità del sapere (Dubovi, 2022; Tene et al., 2024).

La strutturazione di un ambiente immersivo efficace richiede una progettazione educativa consapevole, in grado di coniugare *affordance* tecnologiche e intenzionalità pedagogica. I dispositivi più diffusi (Oculus Quest, HTC Vive, Pico Neo, Microsoft HoloLens) offrono funzionalità avanzate di interazione, navigazione e manipolazione tridimensionale. Tuttavia, la loro efficacia formativa è direttamente proporzionale alla capacità del docente di orientarne l'uso verso finalità epistemiche e non meramente spettacolari (Campos et al., 2022; Çeken & Taskin, 2022).

Il concetto di presenza, la sensazione soggettiva di essere realmente situati all'interno dell'ambiente simulato, si rivela un parametro fondamentale per valutare la qualità dell'interazione uomo-macchina. Tale percezione è influenzata da fattori tecnici (risoluzione, *frame rate*, latenza), cognitivi (carico cognitivo, familiarità con la tecnologia) ed emotivi (coinvolgimento, curiosità, senso di autoefficacia) (Strojny & Dużmańska-Misiarczyk, 2023; Gui et al., 2023).

Nondimeno, la *agency*, ossia la possibilità per il discente di agire intenzionalmente, esplorare, modificare e co-costruire il sapere, rappresenta una componente essenziale dell'esperienza formativa immersiva. Gli ambienti virtuali si configurano dunque come spazi semiotici tridimensionali nei quali l'interazione visiva, sonora, aptica e gestuale converge in una sinestesia didattica capace di potenziare l'*engagement* e la *retention* delle informazioni (Bogusevschi et al., 2020).

L'utilizzo di *controller* o sistemi di *motion tracking* rende tangibile l'esplorazione di concetti astratti, come nella modellizzazione molecolare o nella ricostruzione storica, trasformando l'ambiente virtuale in una matrice cognitiva che stimola il pensiero computazionale e riflessivo (Lee et al., 2024). Tali ambienti permettono l'inferenza causale, la soluzione di problemi e la manipolazione di modelli dinamici, risultando efficaci soprattutto nell'insegnamento delle discipline STEM (Zhang, Feijoo-Garcia, Gu, Popescu, Benes, & Magana, 2024).

L'integrazione di *avatar*, assistenti virtuali e intelligenza artificiale permette l'attivazione di dinamiche di *tutoring* personalizzato, *feedback* immediato e collaborazione asincrona, ampliando le possibilità di differenziazione didattica e inclusione (Çoban, Akçay, & Çelik, 2022; Hamed & Aljanazrah, 2020). I visori *standalone* di nuova generazione, dotati di *eye-tracking*, biosensori e interfacce neurali, stanno ampliando ulteriormente le opportunità di personalizzazione e monitoraggio formativo (Ogegbo et al., 2025; Dubovi, 2022).

Un'altra dimensione rilevante è l'interoperabilità tra ambienti e dispositivi, che consente la costruzione di ecosistemi di apprendimento flessibili, modulabili e transmediali. Si diffondono così modelli di *blended immersive learning*, nei quali la VR è integrata in un curricolo che alterna attività in presenza, *online* e nel metaverso (Mafarja et al., 2024; Yang et al., 2024).

L'ambiente di apprendimento si configura come ecologia aumentata, dove interagiscono tecnologie, soggetti, linguaggi e pratiche, generando conoscenza situata e incarnata. Questo impone un ripensamento del ruolo docente, da trasmettitore a regista pedagogico e facilitatore epistemico, in grado di guidare lo studente nella navigazione simbolica del sapere e nella riflessione metacognitiva.

Va tuttavia riconosciuto che la complessità di tali dispositivi richiede un'alfabetizzazione tecnologica diffusa. L'accesso diseguale alle tecnologie immersive, legato a fattori economici, infrastrutturali e culturali, può generare nuove forme di esclusione digitale, sollevando interrogativi etici sull'equità educativa (Wahyudiati, 2023a; Danmali et al., 2024). Inoltre, la progettazione di ambienti VR accessibili anche per studenti con bisogni educativi speciali è un nodo cruciale per garantire l'inclusione, mediante interfacce multimodali e dispositivi di supporto (Nersesian, Spryszynski, & Lee, 2019).

Infine, l'adozione delle tecnologie immersive sollecita una riflessione sulle implicazioni etiche della mediazione didattica. La simulazione realistica, la rappresentazione simbolica dei corpi e la raccolta di dati biometrici pongono interrogativi sul controllo, la sorveglianza e l'autonomia

del soggetto in apprendimento (Lee et al., 2024; Elme et al., 2022). È quindi imprescindibile una *governance* educativa orientata a finalità emancipative, supportata da una formazione docenti solida, che coniughi innovazione, riflessività e responsabilità. Solo attraverso tale consapevolezza critica le tecnologie immersive potranno trasformarsi da strumenti tecnici a dispositivi formativi, da ambienti simulati a spazi di significazione educativa.

I.2.2.1 Classificazione e struttura dei dispositivi immersivi

A partire da una categorizzazione consolidata nella letteratura scientifica, è possibile distinguere tre principali livelli di immersività: (1) la VR non immersiva, spesso veicolata tramite *desktop* e interfacce grafiche bidimensionali; (2) la VR semi-immersiva, che include proiezioni 3D e ambienti CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*); e (3) la VR totalmente immersiva, resa possibile dai visori HMD e da controller aptici capaci di rilevare i movimenti corporei e la direzione dello sguardo (Lee et al., 2024; Hamilton et al., 2020).

A questi si affiancano i dispositivi di realtà aumentata, che sovrappongono elementi digitali al mondo reale mediante *display* trasparenti o *monitor* mobili. Le AR *smartglasses*, ad esempio, consentono di integrare livelli informativi aggiuntivi direttamente nella visuale dell'utente, senza interrompere il contatto con l'ambiente fisico (Campos et al., 2022). Infine, le soluzioni di realtà mista coniugano in modo sinergico le potenzialità della VR e dell'AR, permettendo l'interazione simultanea con elementi fisici e digitali in ambienti condivisi e collaborativi (Kavanagh, Luxton-Reilly, Wuensche, & Plimmer, 2017; Ogegbo et al., 2025).

Tali dispositivi non vanno intesi in modo meramente funzionalista, ma come tecnologie dotate di una propria grammatica semiotica, in grado di modulare l'interazione didattica secondo nuovi codici di significazione. La manipolazione di oggetti virtuali, il *feedback* aptico e la navigazione spaziale agita direttamente dal corpo dell'allievo sollecitano infatti un ripensamento della conoscenza come costruzione incarnata, contestualizzata e distribuita.

Inoltre, si assiste oggi a un'evoluzione delle applicazioni VR verso ambienti multiutente e collaborativi, in cui gruppi di studenti possono interagire simultaneamente in spazi virtuali condivisi, sviluppando competenze cooperative, negoziali e progettuali (Pellas et al., 2020; Groshans et al., 2019). In tali contesti, l'apprendimento non avviene solo in un ambiente simulato, ma con l'ambiente stesso, attraverso un processo di costruzione intersoggettiva del significato. L'integrazione di intelligenza artificiale, *analytics* e realtà aumentata in alcuni di questi ambienti VR di nuova generazione apre scenari di apprendimento adattivo, in cui la simulazione si adatta in tempo reale al profilo cognitivo ed emotivo dello studente (Tene et al., 2024; Lee et al., 2024).

I.2.2.2 Ambienti immersivi e interattività: verso una didattica aumentata

Gli ambienti virtuali generati da queste tecnologie non si configurano semplicemente come scenari digitali, bensì come spazi pedagogici dotati di coerenza interna, intenzionalità progettuale e profondità semantica. È attraverso la progettazione di ambienti tridimensionali, esplorabili e manipolabili, che diviene possibile attivare una didattica fondata sul *learning by doing*, sulla simulazione esperienziale e sulla riflessione metacognitiva (Pellas et al., 2020; Danmali et al., 2024).

Tali ambienti, infatti, offrono un *setting* didattico favorevole all'attivazione di processi cognitivi complessi come l'inferenza causale, la soluzione di problemi, la rappresentazione mentale tridimensionale e la rotazione spaziale, risultando particolarmente efficaci nell'insegnamento delle discipline STEM e in ambiti curricolari che richiedono la manipolazione di concetti astratti o modelli dinamici (Zhang et al., 2024; Soroko et al., 2021).

A titolo esemplificativo, la possibilità di entrare all'interno di una cellula biologica in scala aumentata, di osservare in prima persona i meccanismi delle forze fisiche o di simulare scenari di laboratorio chimico in sicurezza, offre agli studenti esperienze altrimenti inaccessibili nel contesto scolastico

tradizionale, contribuendo così alla costruzione di una conoscenza situata e profondamente significativa (Groshans et al., 2019; Wahyudiati, 2023a).

Inoltre, la presenza di *avatar*, assistenti virtuali e sistemi di intelligenza artificiale integrati negli ambienti immersivi consente l'attivazione di dinamiche di *tutoring* personalizzato, *feedback* immediato e collaborazione asincrona, ampliando così le possibilità di differenziazione didattica e di inclusione di studenti con bisogni educativi speciali.

I.2.2.3 Considerazioni critiche e implicazioni pedagogiche

L'adozione delle tecnologie immersive comporta anche una serie di criticità e di nodi irrisolti che interrogano in profondità il ruolo della scuola, la formazione degli insegnanti e il quadro valoriale entro cui tali strumenti vengono utilizzati. In particolare, la disponibilità disomogenea delle tecnologie, le disparità di accesso, il rischio di iperstimolazione sensoriale e la possibilità di isolamento sociale costituiscono elementi che richiedono una progettualità consapevole e una *governance* educativa attenta (Verawati, Ernita, & Prayogi, 2022; Nersesian et al., 2019).

A tal proposito, diversi studi sottolineano la necessità di una formazione docente specifica e continua, che consenta agli insegnanti non solo di padroneggiare gli strumenti tecnici, ma di elaborare un vero e proprio pensiero pedagogico digitale, capace di orientare l'utilizzo delle tecnologie immersive all'interno di un progetto formativo integrato (Lege & Bonner, 2020; Flegr, Kuhn & Scheiter, 2023).

Infine, è importante ribadire che la tecnologia, da sola, non garantisce l'innovazione educativa. Come affermano Gui et al. (2023), è nella sinergia tra artefatti tecnologici, dispositivi cognitivi e relazioni significative che si gioca la reale efficacia formativa degli ambienti immersivi. È pertanto imprescindibile che le scelte didattiche siano sempre guidate da una visione educativa intenzionale, inclusiva e riflessiva, capace di coniugare il rigore epistemologico con l'apertura all'alterità e alla complessità.

Come rilevato da Muscarà et al. (2024), non è la tecnologia in sé a produrre innovazione, ma l'uso pedagogico consapevole che ne orienta le

finalità, ne interroga i limiti e ne valorizza il potenziale trasformativo. In tal senso, la VR può costituire una leva strategica per il ripensamento della scuola come ambiente di apprendimento esperienziale, riflessivo e partecipato, a condizione che essa venga inserita in un progetto educativo più ampio, capace di integrare sapere, senso e relazione.

Va osservato che l'efficacia delle applicazioni VR non è funzione univoca della tecnologia impiegata, bensì del grado di integrazione tra design esperienziale, sceneggiatura pedagogica e articolazione valutativa. Gli studi più solidi in letteratura evidenziano come le esperienze di apprendimento immersive producano risultati significativi solo se inserite in un ecosistema didattico che ne accompagni ogni fase: dalla predisposizione di obiettivi formativi chiari, alla guida interattiva durante l'esperienza, fino alla rielaborazione post-immersione attraverso attività metacognitive (Radianti et al., 2020; Elme et al., 2022). In tale cornice, la VR non sostituisce la mediazione educativa, bensì la esige e la rafforza, rendendo ancora più evidente la centralità del docente come progettista, facilitatore e mediatore semiotico dell'esperienza didattica.

I.2.3 VR nella didattica: vantaggi e limiti percepiti

L'introduzione della realtà virtuale (VR) nei contesti educativi rappresenta una delle innovazioni metodologiche più significative del panorama pedagogico contemporaneo. Essa si configura non soltanto come strumento abilitante di nuovi scenari didattici, ma come dispositivo epistemico capace di ridefinire in profondità le dimensioni cognitive, relazionali ed emotive dell'apprendimento. In tale prospettiva, appare necessario superare una visione riduttiva della VR come semplice replica tridimensionale della realtà fisica, per comprenderla come ambiente simbolico capace di agire trasformativamente sui processi formativi (Gui et al., 2023).

I benefici riscontrati nella letteratura scientifica sono molteplici e investono differenti piani del processo formativo. Anzitutto, si evidenzia un significativo incremento della motivazione intrinseca e dell'*engagement*

attivo degli studenti, reso possibile dalla natura immersiva degli ambienti virtuali e dalla possibilità di interazione diretta con oggetti, scenari e fenomeni simulati (Gui et al., 2023; Wahyudiati, 2023a).

L'esperienza immersiva si associa alla possibilità di sviluppare conoscenze situate e incarnate, in cui l'agire corporeo, l'esplorazione spaziale e l'interazione simbolica convergono nella costruzione di significato. La VR consente dunque di promuovere un apprendimento esperienziale e riflessivo, basato sulla manipolazione attiva, sulla formulazione di ipotesi, sulla ristrutturazione dei modelli mentali e sulla negoziazione intersoggettiva (Elme et al., 2022; Pellas et al., 2020). In questo senso, l'ambiente virtuale si configura come uno spazio semiotico di alta densità, in grado di attivare processi cognitivi superiori e abilità metacognitive.

Numerosi studi sottolineano inoltre il ruolo determinante delle emozioni nell'ambito dell'apprendimento in ambienti VR. Emozioni positive come curiosità, meraviglia e soddisfazione si configurano come catalizzatori dell'apprendimento significativo, favorendo l'elaborazione profonda e la memorizzazione a lungo termine (Dubovi, 2022; Hamed & Aljanazrah, 2020). Il coinvolgimento emotivo, generato dalla plausibilità percettiva e dalla dimensione esplorativa dell'ambiente virtuale, sostiene lo sviluppo di atteggiamenti positivi verso la conoscenza, contribuendo alla costruzione di un'identità epistemica attiva e partecipativa (Lee et al., 2024; Wahyudiati, 2023b).

Ulteriori vantaggi si registrano sul piano dell'inclusione, relativamente alla possibilità di progettare esperienze altamente personalizzabili, adattabili ai bisogni specifici di studenti con disabilità, con difficoltà di apprendimento o con stili cognitivi divergenti, rende la VR uno strumento privilegiato per una didattica differenziata (Ogegbo et al., 2025; Çoban et al., 2022). L'accesso a contesti simulati altamente specializzati, normalmente inaccessibili per limiti geografici, economici o infrastrutturali, permette di ampliare l'orizzonte culturale degli apprendenti, riducendo il *digital divide* e promuovendo un'educazione realmente inclusiva (Campos et al., 2022; Verawati et al., 2022).

Tuttavia, a fronte di tali opportunità, emergono anche limiti e criticità da considerare attentamente. Da un lato, la complessità tecnica dei dispositivi e la necessità di infrastrutture adeguate costituiscono una barriera rilevante alla diffusione sistemica della VR, soprattutto in contesti scolastici con risorse limitate (Danmali et al., 2024; Kavanagh et al., 2017). Le difficoltà legate alla configurazione e manutenzione dei dispositivi, alla compatibilità con le piattaforme esistenti e alla mancanza di supporto tecnico-didattico scoraggiano spesso i docenti, che non sempre dispongono delle competenze necessarie (Hamilton, McKechnie, Edgerton, & Wilson, 2020; Groshans et al., 2019).

Inoltre, un utilizzo prolungato e non regolato della VR può determinare effetti collaterali quali affaticamento visivo, disorientamento cognitivo e *cybersickness*, in particolare tra studenti più giovani o con profili neurocognitivi vulnerabili (Strojny & Dużmańska-Misiarczyk, 2023; Xie, Li, & Tang, 2023). Tali fenomeni impongono una progettazione didattica attenta alla gradualità dell'esposizione, alla modulazione dei contenuti e alla personalizzazione dell'esperienza.

Non meno rilevante è il rischio che l'adozione della VR si traduca in una spettacolarizzazione dell'apprendimento, laddove venga impiegata in assenza di una cornice intenzionale e riflessiva. Esperienze immersive isolate, non inserite in un percorso coerente e articolato, rischiano di generare un coinvolgimento effimero, privo di profondità cognitiva e valore trasformativo (Lege & Bonner, 2020; Tene et al., 2024). È quindi fondamentale che il docente mantenga un ruolo attivo di mediazione, curvatura didattica e metariflessione, guidando lo studente nella rielaborazione dell'esperienza e nella sua integrazione con altri saperi.

Dal punto di vista valutativo, l'introduzione della VR sollecita una revisione dei tradizionali strumenti di verifica, spesso inadeguati a cogliere la complessità processuale e multimodale delle esperienze immersive. In tal senso, sarebbe opportuno l'adozione di rubriche valutative dinamiche, capaci di valorizzare i processi di esplorazione, cooperazione e riflessione attivati dallo studente all'interno dell'ambiente virtuale (Yang et al., 2024).

A livello epistemologico, è fondamentale riconoscere che la VR, pur nella sua verosimiglianza percettiva, non può sostituire l'esperienza del mondo reale, né garantisce in sé autenticità epistemica. L'interazione con ambienti simulati, se non adeguatamente problematizzata, rischia di favorire una visione riduttiva e deterministica dei fenomeni, generando una dipendenza acritica dal virtuale (Li et al., 2022; Nersesian et al., 2019; Fajardo Tovar, Jonker, & Wolfgang, 2020).

Merita un'attenta riflessione anche l'ambivalenza pedagogica dell'immersione, che, pur configurandosi come leva per il coinvolgimento e la simulazione esperienziale, può comportare un restringimento delle possibilità di astrazione e di decentramento cognitivo, qualora non mediata da pratiche didattiche riflessive (Bogusevschi et al., 2020). Infatti, come spesso evidenziano l'immersività, se non problematizzata, può collocare lo studente in una condizione di sovraidentificazione con il contesto virtuale, riducendo la sua capacità di distanziamento critico e di transfert verso altri contesti epistemici. In questo senso, l'atto educativo deve reintrodurre consapevolmente pratiche dialogiche, metariflessioni e attività di astrazione che consentano allo studente di transitare dall'esperienza simulata alla concettualizzazione sistematica (Minerva, Lee, & Crespi, 2020).

Inoltre, si ravvisa, in alcune ricerche, il pericolo di un eccessivo orientamento alla performance, in cui la VR viene percepita dagli studenti non tanto come ambiente di apprendimento significativo, quanto come strumento ludico-competitivo che enfatizza l'efficacia operativa più che la comprensione profonda (Yang et al., 2024; Cromley et al., 2023). Ciò può determinare un'apprensione meramente strumentale delle conoscenze, orientata al compito e alla risoluzione immediata, piuttosto che al consolidamento di schemi concettuali duraturi. In particolare, nei contesti STEM, la tendenza alla *gamification* indiscriminata delle esperienze immersive può favorire un apprendimento frammentario, orientato alla ricompensa e non alla costruzione riflessiva (Tene et al., 2024; Marougkas, Troussas, Krouska & Sgouropoulou, 2023).

In tale prospettiva, diviene imprescindibile riconsiderare il ruolo dell'insegnante come regista pedagogico dell'esperienza immersiva, capace

di progettare, guidare e decodificare l'ambiente virtuale in funzione degli obiettivi educativi (Çeken & Taskin, 2022). La letteratura converge nel sottolineare che il valore aggiunto della VR si manifesta pienamente solo quando essa è incorporata in una progettazione didattica integrata, fondata su obiettivi cognitivi espliciti, strategie di accompagnamento e strumenti di valutazione coerenti (Campos et al., 2022; Elme et al., 2022). L'adozione della VR, dunque, non può essere interpretata come mera innovazione tecnologica, bensì come esito di un ripensamento complessivo della relazione educativa, che ridefinisce ruoli, posture epistemologiche e dinamiche di interazione (Pellas et al., 2020).

Particolarmente suggestiva risulta, infine, l'analisi delle implicazioni etico-educative dell'uso della realtà virtuale in ambito scolastico. Laddove l'esperienza immersiva diventa sempre più sofisticata e verosimile, si pongono interrogativi cruciali in merito alla responsabilità educativa, alla tutela della soggettività e all'autenticità dell'apprendimento (Lege & Bonner, 2020; Fajardo Tovar et al., 2020). In ambienti in cui l'identità, la corporeità e l'interazione sono parzialmente mediate o simulate, si rende necessaria un'educazione critica alla virtualità, che renda gli studenti consapevoli della costruzione sociale e tecnica degli ambienti in cui agiscono. Senza tale consapevolezza, il rischio è che la VR alimenti un'accettazione acritica della rappresentazione simulata, sostituendo l'esperienza vissuta con una sua versione standardizzata e neutra, apparentemente oggettiva ma culturalmente situata.

A fronte di tali considerazioni, risulta evidente come l'integrazione efficace della VR nella didattica richieda un approccio sistemico e multilivello, che non si limiti alla disponibilità tecnologica, ma coinvolga formazione docente, progettazione curricolare, valutazione formativa e *governance* educativa (Groshans et al., 2019; Danmali et al., 2024). La VR non è, in sé, garanzia di innovazione o qualità, ma può diventarlo nella misura in cui viene abitata criticamente, didatticamente mediata e pedagogicamente orientata. In tale direzione, si delinea una visione dell'educazione tecnologica come pratica culturale complessa, che interroga le finalità del sapere, le forme della conoscenza e le modalità dell'esperienza.

In conclusione, la realtà virtuale rappresenta una risorsa potente ma complessa, capace di trasformare le pratiche educative se inserita in una cornice pedagogica intenzionale, riflessiva e critica. I vantaggi percepiti in termini di motivazione, comprensione concettuale, inclusione ed *engagement* emotivo sono significativi, ma non esenti da condizioni operative, infrastrutturali, metodologiche ed etiche. Affinché la VR possa configurarsi come ambiente generativo di apprendimento, è necessario che la sua adozione sia guidata da una progettualità sistemica, in cui innovazione tecnologica e profondità educativa si coniughino nella costruzione condivisa del sapere.

Nel solco di una pedagogia critica e riflessiva, la realtà virtuale può rappresentare una leva per trasformare la scuola in ambiente generativo di senso, capace di dialogare con i linguaggi del presente senza rinunciare alla profondità del pensiero e alla pluralità delle prospettive nel processo educativo (Muscarà et al., 2024). La sfida non consiste, dunque, nell'introdurre la VR come dispositivo neutro e universale, bensì nel negoziarne criticamente i significati, le pratiche e le finalità, affinché l'innovazione non coincida con l'efficienza tecnologica, ma con una rinnovata intenzionalità pedagogica.

I.2.4 Applicazioni della VR nell'educazione

L'adozione della realtà virtuale (VR) nel contesto educativo rappresenta un'evoluzione paradigmatica dei modelli formativi tradizionali, che apre nuovi orizzonti pedagogici fondati sull'esperienza, sull'interazione e sull'autenticità situata dell'apprendimento. Come già anticipato, essa non si configura soltanto come espediente tecnologico innovativo, ma vuole proporsi come ambiente immersivo dotato di una propria grammatica epistemologica, capace di riconfigurare le relazioni tra soggetto, oggetto e sapere. Nella prospettiva di una didattica trasformativa e riflessiva, l'applicazione della VR si rivela particolarmente efficace nel promuovere forme di apprendimento esperienziale, potenziare il coinvolgimento attivo e generare un elevato senso di presenza, inteso come partecipazione

cognitiva ed emotiva integrata al processo educativo (Gui et al., 2023; Elme et al., 2022).

I.2.4.1 Apprendimento esperienziale

L'apprendimento esperienziale costituisce uno dei principali orizzonti teorici in cui l'impiego della realtà virtuale ha trovato terreno fertile. Secondo l'approccio costruttivista di matrice deweyana e kolbiana, l'apprendimento avviene in modo profondo e significativo quando il soggetto è coinvolto attivamente nella costruzione della conoscenza attraverso esperienze dirette, riflessive e contestualizzate (Dewey, 2014; Kolb, 1984). In questo senso, la VR si configura come ambiente privilegiato per la messa in atto di cicli di apprendimento esperienziale, offrendo agli studenti occasioni per esplorare scenari realistici, manipolare oggetti, assumere ruoli e prendere decisioni in tempo reale, il tutto in un contesto sicuro e pedagogicamente progettato (Flegr et al., 2023; Pellas et al., 2020).

Studi recenti hanno mostrato come l'utilizzo della VR nelle scienze, nella didattica della medicina e nelle discipline tecnico-ingegneristiche favorisca lo sviluppo di competenze procedurali, la comprensione di fenomeni complessi e l'internalizzazione di concetti astratti grazie alla possibilità di interagire in prima persona con ambienti simulati ad alta fedeltà (Zhang et al., 2024; Cromley et al., 2023). La possibilità di vivere in prima persona esperienze altrimenti inaccessibili, come la visita a strutture molecolari, l'osservazione del funzionamento di organi interni o l'esplorazione di ambienti industriali, consente di superare i limiti dell'apprendimento trasmissivo e di attivare percorsi di costruzione autonoma del sapere (Li, Fang & Jiang, 2022; Bogusevschi et al., 2020).

Di particolare rilievo è anche il contributo della VR nell'ambito della formazione iniziale degli insegnanti e nelle pratiche di tirocinio simulato, dove gli ambienti virtuali vengono impiegati per simulare situazioni di gestione della classe, interazioni con studenti virtuali e risoluzione di problemi didattici complessi (Lege & Bonner, 2020; Danmali et al., 2024). In questi casi, la VR non si limita a riprodurre l'ambiente scolastico, ma

diviene spazio di esplorazione riflessiva, in cui l'agente formativo può confrontarsi con la complessità della pratica educativa in un contesto controllato, modificabile e analizzabile.

I.2.4.2 Coinvolgimento attivo e senso di presenza

Uno degli elementi più rilevanti che qualificano l'efficacia della realtà virtuale in ambito educativo è l'elevato grado di coinvolgimento attivo e di senso di presenza che essa è in grado di generare. A differenza degli ambienti digitali tradizionali, in cui la fruizione del contenuto si configura spesso come atto ricettivo e passivo, la VR favorisce una modalità di interazione continua, multisensoriale e intenzionalmente orientata, in cui l'apprendente è chiamato a compiere scelte, a risolvere problemi, a prendere decisioni in un contesto simulato ma percepito come reale (Radianti et al., 2020; Elme et al., 2022). La sensazione di essere lì, tecnicamente definita come presenza immersiva, si traduce, in termini educativi, in una maggiore concentrazione, in un aumento dell'*engagement* e in una più marcata persistenza dell'apprendimento (Gui et al., 2023; Hamilton et al., 2020).

La letteratura rileva come il senso di presenza sia direttamente correlato al grado di realismo percettivo e di coerenza narrativa dell'ambiente virtuale, nonché alla libertà d'azione concessa allo studente. Quando l'interazione con lo spazio simulato è fluida, coerente e dotata di significato, il soggetto tende a sospendere il giudizio di finzione e a proiettare la propria attenzione e il proprio investimento emotivo all'interno dell'esperienza (Strojny & Dużmańska-Misiarczyk, 2023; Wahyudiati, 2023a). Tale condizione favorisce l'attivazione di processi cognitivi complessi e l'elaborazione profonda dei contenuti, in linea con i principi dell'elaborazione duale delle informazioni visive e testuali (Cromley et al., 2023).

Inoltre, numerosi studi documentano come il coinvolgimento attivo derivante dall'interazione immersiva generi non solo un apprendimento più efficace, ma anche un cambiamento negli atteggiamenti e nelle disposizioni affettive verso la disciplina oggetto di studio. È stato dimostrato, ad

esempio, che gli studenti coinvolti in esperienze VR nel campo della biologia o della fisica sviluppano una maggiore autoefficacia percepita e un atteggiamento positivo nei confronti delle materie scientifiche, anche in soggetti con pregresse difficoltà o bassa motivazione (Zhang et al., 2024; Tene et al., 2024; Wahyudiati, 2023b).

Di particolare rilievo è il ruolo del senso di presenza nella formazione delle competenze socio-relazionali e comunicative. In contesti simulati di natura collaborativa, come ad esempio quelli destinati alla formazione sanitaria o all'educazione interculturale, la VR consente di sperimentare situazioni dialogiche complesse, in cui l'apprendente è chiamato a interagire con *avatar* realistici, modulando il proprio comportamento sulla base di *feedback* situazionali (Kavanagh, Luxton-Reilly, Wuensche, & Plimmer, 2017; Groshans et al., 2019). In questi casi, l'ambiente virtuale non si limita a fornire contenuti, ma diventa contesto d'azione, spazio relazionale e campo di prova dell'identità in formazione (Nersesian et al., 2019).

Tuttavia, è necessario sottolineare che il coinvolgimento attivo e il senso di presenza non si generano automaticamente per effetto dell'utilizzo della tecnologia, ma sono il frutto di un'attenta progettazione didattica, di una selezione consapevole degli strumenti e di un accompagnamento pedagogico esperto. Esperienze immersive mal calibrate, eccessivamente complesse o incoerenti con gli obiettivi formativi, possono generare confusione, ansia da prestazione o un coinvolgimento meramente ludico, svuotato di intenzionalità cognitiva (Campos et al., 2022; Li et al., 2022). È dunque compito del docente progettare ambienti significativi, ancorati a compiti autentici, in grado di sollecitare non solo l'azione, ma anche la riflessione e la rielaborazione critica dell'esperienza.

I.2.5 Studi recenti sull'uso della VR nelle discipline STEM: evidenze empiriche di efficacia

L'impiego della realtà virtuale nell'insegnamento delle discipline STEM ha generato, nel corso degli ultimi anni, un crescente interesse empirico e teorico da parte della comunità scientifica internazionale. La letteratura

documenta in modo convergente l'efficacia della VR nel promuovere apprendimenti duraturi, concettualmente profondi e cognitivamente rilevanti, soprattutto in aree disciplinari caratterizzate da un elevato grado di astrazione e da un forte fabbisogno di visualizzazione spaziale e dinamica (Zhang et al., 2024; Cromley et al., 2023). Tale interesse si colloca tra le finalità trasformative dell'educazione STEM e il potenziale semiotico della tecnologia immersiva, in quanto strumento di modellizzazione concettuale e di esplorazione multisensoriale del reale.

Numerosi studi di matrice quantitativa e mista hanno rilevato miglioramenti statisticamente significativi nei risultati di apprendimento degli studenti esposti a esperienze immersive rispetto a gruppi di controllo sottoposti a modalità didattiche tradizionali o digitali non interattive. Particolarmente emblematico, in tal senso, è lo studio di Gui et al. (2023), una meta-analisi che ha sintetizzato evidenze empiriche provenienti da campioni eterogenei, includendo sia adolescenti in contesto scolastico (12-17 anni) sia studenti universitari, offrendo un quadro comparativo trasversale rispetto ai differenti livelli formativi, e rilevato un incremento medio consistente nei punteggi post-test nei campioni di studenti accompagnati da un modulo VR STEM, con effetti positivi anche sulla motivazione e sulla consapevolezza metacognitiva. Analogamente, l'indagine condotta da Wahyudiati (2023b) sull'insegnamento della chimica, con gruppi di studenti di 16-17 anni, ha evidenziato come l'impiego di ambienti virtuali immersivi abbia favorito una comprensione più stabile delle trasformazioni molecolari, specialmente in studenti con stili cognitivi visuo-spaziali predominanti.

L'efficacia dell'approccio immersivo risulta amplificata nei contesti in cui le simulazioni virtuali permettono l'interazione dinamica con entità e processi non direttamente osservabili, come nel caso di modelli tridimensionali di molecole, circuiti elettronici o strutture biologiche complesse (Bogusevschi et al., 2020; Lee et al., 2024). In questi casi, l'ambiente virtuale diviene uno spazio semantico denso, in cui l'apprendente costruisce progressivamente rappresentazioni mentali congruenti con i modelli scientifici di riferimento, riducendo l'ambiguità

cognitiva e facilitando la generalizzazione concettuale (Flegr et al., 2023; Elme et al., 2022).

A supporto di ciò, gli studi longitudinali di Pellas et al. (2020), riferiti a pre-adolescenti e adolescenti, corrispondenti rispettivamente ai livelli della scuola secondaria di primo e di secondo grado (10-18 anni), hanno evidenziato come l'inserimento di moduli VR in percorsi curricolari di fisica abbia determinato non solo un miglioramento nelle performance cognitive, ma anche una maggiore ritenzione dei concetti appresi a distanza di settimane, rispetto ai metodi di insegnamento tradizionali. Questo effetto di persistenza è stato interpretato alla luce del maggior coinvolgimento sensomotorio e della codifica mnemonica multimodale favorita dagli ambienti immersivi, che attivano simultaneamente canali percettivi, affettivi e simbolici (Radianti et al., 2020; Cromley et al., 2023).

Oltre agli esiti cognitivi, diversi studi hanno approfondito la dimensione emozionale e motivazionale dell'apprendimento STEM in ambienti VR. Le ricerche di Dubovi (2022) e Hamed & Aljanazrah (2020) mettono in luce come la possibilità di esplorare ambienti simulati in modo autonomo, ricevendo *feedback* immediati e visualizzando il risultato delle proprie azioni, contribuisca a incrementare l'interesse verso le discipline scientifiche, specialmente in soggetti inizialmente poco motivati o con storie scolastiche di insuccesso. Il piacere esplorativo, la sensazione di controllo e l'effetto di presenza generano, infatti, un contesto emozionale favorevole alla concentrazione e alla disponibilità all'apprendimento, in linea con i modelli della motivazione autoregolata (Tene et al., 2024; Yang et al., 2024).

All'interno delle indagini più recenti sull'efficacia della realtà virtuale nelle discipline STEM, lo studio di Matovu et al. (2023) si distingue per la sua articolata struttura sperimentale e per l'interesse dimostrato nei confronti dei processi di costruzione concettuale in ambito chimico, biologico e fisico. La ricerca, condotta con studenti universitari iscritti a corsi di chimica generale, ha adottato un approccio quasi-sperimentale con assegnazione non casuale dei gruppi, finalizzato a confrontare l'impatto di un ambiente di realtà virtuale immersiva (Immersive Virtual Reality, IVR)

rispetto a un ambiente di apprendimento convenzionale (*desktop-based learning*). L'ambiente IVR è stato progettato per rappresentare visualmente reazioni chimiche in fase molecolare, consentendo agli studenti di interagire tridimensionalmente con particelle e strutture, in linea con una prospettiva costruttivista dell'apprendimento in cui l'immersione multisensoriale e la manipolazione diretta degli oggetti digitali fungono da leve cognitive per la comprensione di fenomeni astratti e complessi. I risultati mostrano che gli studenti del gruppo IVR hanno ottenuto performance significativamente superiori nei test post-esperimento rispetto al gruppo DBL, con miglioramenti riconducibili alla più elevata attenzione selettiva, al maggiore coinvolgimento cognitivo e alla più efficace integrazione tra rappresentazioni multiple.

Dal punto di vista metodologico, lo studio utilizza una triangolazione tra dati quantitativi (test pre-post) e qualitativi (interviste semi-strutturate), evidenziando come l'esperienza immersiva non solo supporti l'apprendimento dichiarativo, ma favorisca la costruzione di modelli mentali dinamici e coerenti, coerentemente con quanto sostenuto dalle teorie della doppia codifica e dell'elaborazione multimodale dell'informazione. In particolare, l'ambiente IVR sembra sollecitare una forma di *embodied cognition*, in cui il senso di presenza e *agency* favoriscono un'appropriazione attiva dei contenuti disciplinari (Matovu et al.,2023).

Ulteriori ricerche si sono concentrate sulla capacità della VR di favorire lo sviluppo di abilità trasversali, spesso trascurate nei percorsi STEM tradizionali. Gli studi di Lege e Bonner (2020) e di Danmali et al. (2024), condotti rispettivamente con studenti universitari e futuri insegnanti, dimostrano che l'interazione con ambienti immersivi può sollecitare il pensiero critico, la presa di decisioni in contesti incerti, la capacità di trasferire conoscenze in situazioni nuove e la flessibilità cognitiva. In questi casi, la VR funziona non solo come rappresentazione di contenuti, ma come ambiente di pratica situata, in cui lo studente è chiamato a operare scelte epistemicamente fondate (Buckey, 2021).

Un filone di studi di genere, inoltre, ha sottolineato l'impatto positivo della VR nella riduzione del divario tra maschi e femmine nella promozione dell'equità educativa nelle discipline STEM. È stato osservato, ad esempio, che ambienti VR ben progettati favoriscono un accesso paritetico all'interazione e all'esplorazione, attenuando le barriere legate a preconcetti di competenza, alla pressione del gruppo o alla scarsa fiducia in sé, spesso riscontrati tra le studentesse in ambiti scientifici (Çoban, Akçay, & Çelik, 2022; Ogegbo et al., 2025). La neutralità del *setting* virtuale, unita alla possibilità di personalizzazione e di gestione autonoma del ritmo, contribuisce a costruire un contesto di apprendimento più inclusivo, motivante e sicuro.

Le evidenze empiriche sull'uso della VR nelle discipline STEM mostrano un quadro complesso ma tendenzialmente convergente. L'immersività non solo aumenta la comprensione dei concetti astratti, ma genera anche condizioni favorevoli alla motivazione, all'equità e alla costruzione di competenze di ordine superiore. Tuttavia, l'efficacia dell'innovazione didattica non può mai essere scissa dalla qualità della progettazione pedagogica, dalla riflessione teorica e dal contesto educativo in cui essa si realizza. La VR non è soluzione universale, ma una potente risorsa se contestualizzata all'interno di un disegno formativo coerente, intenzionale e dialogico.

Tale panorama, per quanto ricco e promettente, evidenzia tuttavia alcune variabilità legate al disegno sperimentale adottato, alla durata degli interventi e al profilo degli studenti coinvolti. Alcuni studi, come quello di Nersesian et al. (2019), hanno rilevato che i benefici della realtà virtuale in ambito STEM si manifestano in maniera più significativa negli studenti con stili di apprendimento visivo o con livelli iniziali medio-bassi di conoscenza, suggerendo un'interazione complessa tra fattori individuali e caratteristiche dell'ambiente immersivo. Questo implica che l'efficacia della VR non possa essere considerata univoca o lineare, ma debba essere analizzata alla luce di un modello multifattoriale, che tenga conto delle variabili disposizionali, motivazionali e contestuali.

Inoltre, l'analisi trasversale di alcune meta-analisi e revisioni sistematiche (Radianti et al., 2020; Cromley et al., 2023) evidenzia che, sebbene i risultati siano generalmente positivi, la magnitudo dell'effetto della VR rispetto alle strategie didattiche convenzionali varia in funzione del tipo di contenuto, del grado di interattività dell'esperienza e della presenza o meno di attività complementari come *briefing* e *debriefing*. Ciò rafforza l'idea, già sostenuta da Elme et al. (2022), che la VR possa esprimere il massimo potenziale se inserita in un ecosistema didattico strutturato, basato sull'alternanza tra esperienza, riflessione e rielaborazione.

Un ulteriore elemento di riflessione riguarda la sostenibilità didattica delle esperienze VR nel lungo periodo. Studi come quello di Li et al. (2022) hanno sottolineato come gli effetti positivi sull'apprendimento tendano a decrescere se le esperienze immersive non vengono aggiornate, modulate e integrate in modo flessibile all'interno del curricolo. L'effetto novità, se non sostenuto da una progettualità solida, rischia infatti di trasformarsi in routine strumentale, perdendo la sua carica innovativa e motivazionale. In questo senso, la riflessione pedagogica sulla VR deve accompagnarsi a una costante attenzione ai processi di manutenzione culturale e trasformazione didattica, affinché la tecnologia non divenga un semplice artefatto ripetitivo, ma uno stimolo per l'evoluzione delle pratiche.

Da ultimo, si osserva come alcuni studi stiano tentando di indagare l'impatto della VR non solo sull'apprendimento disciplinare, ma anche sullo sviluppo della *scientific literacy*, intesa come capacità di utilizzare conoscenze scientifiche per prendere decisioni informate, comprendere problemi globali e partecipare in modo critico alla vita sociale (Campos et al., 2022; Wahyudiati, 2023a). In tal senso, l'esperienza immersiva viene esplorata come leva per promuovere l'educazione scientifica integrata, fondata su competenze interpretative, etiche e comunicative che vanno oltre la mera comprensione tecnica. Tale prospettiva apre una linea di ricerca promettente, orientata non soltanto a misurare l'efficacia della VR in termini di *output* cognitivi, ma anche a indagarne il contributo alla formazione del cittadino consapevole e socialmente partecipe.

Emerge con forza la necessità di valutare sistematicamente gli effetti dell'uso della VR nei diversi livelli di istruzione, non solo in termini di apprendimento disciplinare, ma anche di impatto sul benessere, sulla motivazione e sulle dinamiche relazionali. Sebbene molteplici studi evidenzino miglioramenti nelle performance e negli indicatori di *engagement*, resta ancora parzialmente inesplorato il potenziale trasformativo della VR come catalizzatore di comunità di apprendimento inclusive, collaborative e dialogiche. In questa direzione, si impone l'urgenza di una ricerca educativa integrata, capace di coniugare rigore metodologico, apertura epistemica e attenzione alle implicazioni pedagogiche profonde dell'innovazione tecnologica.

I.2.5.1 Approcci metodologici usati

Il crescente interesse per l'utilizzo della realtà virtuale nei contesti educativi STEM ha generato una molteplicità di studi empirici che, pur condividendo l'oggetto di indagine, si distinguono per le diverse scelte metodologiche adottate. Tali scelte riflettono sia la varietà degli obiettivi formativi perseguiti, sia la complessità del fenomeno educativo analizzato, che implica una pluralità di dimensioni, cognitive, affettive, motivazionali, relazionali, difficilmente riconducibili a un'unica prospettiva epistemologica.

Prevale, nella letteratura recente, l'adozione di disegni di ricerca quantitativi sperimentali e quasi-sperimentali, volti a misurare l'efficacia dell'intervento VR rispetto a condizioni di controllo. In tali studi, i partecipanti vengono assegnati a gruppi sperimentali e di controllo, e sottoposti a test pre e post-intervento, al fine di rilevare differenze significative nei livelli di apprendimento, motivazione, autoefficacia o altre variabili dipendenti (Gui et al., 2023; Wahyudiati, 2023b). L'impiego di strumenti standardizzati, come test cognitivi, scale Likert e griglie di osservazione, consente di quantificare gli effetti dell'esperienza immersiva con un certo grado di attendibilità statistica, sebbene talvolta legate ad un certo grado di libertà interpretativa (Cromley et al., 2023; Tene et al., 2024).

Accanto a questi approcci, si è affermata una linea di ricerca fondata su metodologie miste (*mixed methods*), che combinano dati quantitativi e qualitativi al fine di ottenere una comprensione più articolata e integrata dell'esperienza educativa. L' utilizzo di questionari pre-post unitamente ad analisi del contenuto di interviste, focus group o diari riflessivi, con l'intento di esplorare non solo quanto la VR incida sull'apprendimento, ma anche come gli studenti vivano e interpretino tale esperienza. Questo approccio si rivela particolarmente fecondo nel cogliere le dinamiche soggettive, i significati attribuiti, le resistenze o le condizioni facilitanti, valorizzando la dimensione fenomenologica dell'apprendimento in ambienti immersivi.

Un numero crescente di contributi adotta inoltre approcci qualitativi interpretativi, particolarmente utili nei contesti esplorativi, inclusivi o formativi, dove l'obiettivo è comprendere in profondità le traiettorie di senso attivate dagli studenti all'interno degli ambienti VR. In questi casi, i ricercatori si avvalgono di tecniche etnografiche, osservazione partecipante, videoregistrazioni o narrazioni autoetnografiche, analizzate attraverso griglie tematiche o codifiche *grounded* (Hamed & Aljanazrah, 2020; Lege & Bonner, 2020). Questo tipo di studi, pur essendo meno generalizzabili, consente di accedere alle dimensioni latenti e affettive dell'esperienza educativa, spesso trascurate dalle misurazioni standardizzate.

Un aspetto metodologico ricorrente riguarda l'uso della valutazione pre-post come strategia per misurare l'efficacia dell'intervento VR. Tuttavia, si evidenzia in alcuni casi una tendenza alla semplificazione del processo valutativo, con scarsa attenzione agli effetti a lungo termine, alla trasferibilità degli apprendimenti e alla dimensione trasformativa del sapere. Per rispondere a queste criticità, alcuni studi hanno iniziato a integrare nei propri disegni valutazioni a *follow-up*, osservazioni prolungate e strumenti di valutazione autentica, quali compiti di *performance*, prodotti digitali o artefatti simbolici prodotti dagli studenti all'interno dell'ambiente VR (Danmali et al., 2024; Ogegbo et al., 2025).

Dal punto di vista analitico, si riscontra una crescente attenzione per l'impiego di tecniche statistiche avanzate, quali l'analisi della varianza (ANOVA), la regressione multivariata, i modelli a equazioni strutturali e, in

alcuni casi, le tecniche di *machine learning* per l'analisi dei *log* di interazione all'interno degli ambienti VR (Zhang et al., 2024; Lee et al., 2024). Tali strumenti permettono di rilevare pattern complessi e relazioni tra variabili che sfuggirebbero a una lettura lineare, contribuendo a rafforzare la solidità inferenziale dei risultati.

Un elemento trasversale riguarda la sfida etica e metodologica della validità ecologica. Molti studi, infatti, sono condotti in ambienti altamente controllati, in condizioni di laboratorio o durante attività isolate, rendendo difficile la generalizzazione dei risultati a contesti scolastici autentici. Per superare tale criticità sarebbe auspicabile realizzare ricerche *in situ*, ovvero ancorate alle pratiche didattiche quotidiane da erogare all'interno degli ambienti scolastici per bene isolare l'effettiva ricaduta pedagogica della VR.

Va inoltre rilevato che una parte significativa della ricerca internazionale sta progressivamente orientandosi verso approcci *design-based* e iterativi, finalizzati non solo a misurare l'impatto della VR sull'apprendimento, ma a co-progettare, testare e perfezionare ciclicamente ambienti immersivi in collaborazione con insegnanti, studenti e sviluppatori. Questo orientamento metodologico, pur più complesso dal punto di vista organizzativo, consente una maggiore aderenza ai contesti reali e una validazione progressiva degli strumenti didattici sviluppati, superando la logica del "prima/dopo" in favore di un paradigma trasformativo e dialogico (Campos et al., 2022; Marougkas et al., 2023).

Un'altra linea metodologica emergente è quella orientata all'analisi dell'esperienza immersiva in tempo reale, grazie all'integrazione di tecnologie di tracciamento comportamentale (*gaze tracking*, *motion capture*, strumenti di rilevazione *biofeedback*) e strumenti di auto-osservazione interattiva. Questi studi mirano a esplorare come gli studenti si muovono nello spazio virtuale, su quali oggetti si concentrano, in quali momenti interagiscono maggiormente o manifestano segnali di disagio o confusione (Strojny & Dużmańska-Misiarczyk, 2023; Xie et al., 2023). Tali dati, opportunamente triangolati con interviste e osservazioni, permettono di generare una rappresentazione dinamica e multimodale

dell'apprendimento, in grado di restituire la complessità dell'esperienza educativa in VR.

A livello teorico-epistemologico, gli approcci metodologici usati nei vari studi si fondano su assunti differenti circa la natura della conoscenza, i meccanismi dell'apprendimento e il ruolo della tecnologia. Nei paradigmi sperimentali di stampo positivista, l'accento è posto sulla misurabilità degli esiti, sulla replicabilità dei risultati e sul controllo delle variabili, spesso a scapito della contestualizzazione pedagogica e dell'interpretazione soggettiva (Gui et al., 2023; Lee et al., 2024). Al contrario, gli approcci costruttivisti e socioculturali tendono a privilegiare la narrazione dei vissuti, l'osservazione delle pratiche e la riflessività degli attori educativi, mirando a comprendere i significati attribuiti all'esperienza immersiva in contesti autentici (Hamed & Aljanazrah, 2020).

Un'altra questione metodologica rilevante concerne il rapporto tra durata dell'intervento e significatività dei risultati ottenuti. In molti casi, le esperienze VR analizzate sono circoscritte a poche ore o a singoli moduli, il che solleva interrogativi circa la profondità e la stabilità degli apprendimenti rilevati. Sebbene alcuni studi abbiano mostrato risultati incoraggianti anche a breve termine (Gui et al., 2023; Li et al., 2022), altri suggeriscono che gli effetti più profondi della realtà virtuale emergono solo in presenza di una continuità pedagogica e di una integrazione curricolare solida (Pellas et al., 2020; Ogegbo et al., 2025). In tal senso, si rendono necessari disegni metodologici di tipo longitudinale, capaci di indagare l'impatto differito della VR, il consolidamento delle conoscenze e l'eventuale trasferibilità in contesti disciplinari diversi.

Ulteriori elementi critici riguardano la standardizzazione degli strumenti di rilevazione impiegati nei diversi studi, che spesso risulta disomogenea e priva di validazione trasversale tra contesti e livelli scolastici. La molteplicità di strumenti utilizzati, questionari ad hoc, rubriche osservative, test disciplinari non sempre tarati, rende talora difficile il confronto tra studi e la costruzione di una base di evidenze cumulativa (Flegr et al., 2023; Wahyudiati, 2023b). Si avverte dunque l'urgenza di promuovere una maggiore convergenza metodologica e la condivisione di repertori

strumentali, che consentano di elaborare indicatori comuni di efficacia didattica della VR nelle STEM, tenendo conto sia degli aspetti cognitivi che di quelli emozionali e motivazionali.

Va inoltre considerata la complessità etica connessa agli studi sulla realtà virtuale in ambito scolastico e universitario. La raccolta di dati all'interno di ambienti immersivi, in particolare se arricchiti da tracciamento biometrico o comportamentale, apre interrogativi cruciali circa la tutela della *privacy*, il consenso informato, la trasparenza degli algoritmi e l'uso secondario dei dati (Strojny & Dużmańska-Misiarczyk, 2023; Dubovi, 2022). Pochi studi, ad oggi, affrontano in modo sistematico queste problematiche, che tuttavia appaiono centrali in una prospettiva pedagogica fondata sulla responsabilità, sull'autodeterminazione degli studenti e sulla giustizia epistemica (Muscarà et al., 2024). Si impone, quindi, una rinnovata attenzione alla dimensione etico-metodologica della ricerca, non come vincolo burocratico, ma come componente intrinseca della qualità scientifica e formativa dell'intervento.

Merita attenzione l'esigenza, ancora parzialmente disattesa, di costruire cornici teoriche robuste a supporto dell'indagine metodologica. Molti studi si limitano a descrivere procedure e risultati senza un esplicito ancoraggio a modelli dell'apprendimento immersivo, alla didattica disciplinare o alla pedagogia critica. Tuttavia, come sottolineano Antonelli et al. (2023) e Radianti et al. (2020), senza un quadro concettuale condiviso, le indagini rischiano di produrre dati decontestualizzati, difficilmente comparabili e poco significativi ai fini del miglioramento delle pratiche. È quindi auspicabile un rafforzamento della dimensione teorica delle ricerche, affinché la VR non sia studiata solo come tecnologia educativa, ma come artefatto culturale e spazio formativo dotato di implicazioni epistemologiche, didattiche ed etiche

Infine, si segnala una lacuna importante, ovvero la rappresentanza geografica e culturale degli studi attualmente disponibili. La maggior parte delle ricerche sull'uso della VR nelle STEM è condotta in contesti occidentali, con una netta prevalenza di esperienze anglosassoni o dell'Asia orientale (Gui et al., 2023; Zhang et al., 2024). Questo squilibrio rischia di

limitare la generalizzabilità dei risultati e di trascurare la pluralità dei modelli educativi, delle infrastrutture tecnologiche.

I.3. Emozioni e apprendimento

Nel dibattito contemporaneo sulle scienze dell'educazione, si assiste a un crescente riconoscimento del ruolo costitutivo che le emozioni assumono nei processi di apprendimento. Lungi dall'essere fattori collaterali o elementi di disturbo, gli stati affettivi configurano una dimensione intrinseca dell'esperienza formativa, determinando la qualità dell'elaborazione cognitiva, la profondità della comprensione e la sostenibilità motivazionale dell'impegno scolastico (Frenzel, Daniels, & Burić, 2021). L'apprendimento, infatti, non è mai un'attività esclusivamente razionale, ma si radica in una complessa interazione tra componenti cognitive, affettive e motivazionali, che modellano la relazione del soggetto con il sapere, con sé stesso e con il contesto educativo.

Le emozioni che emergono nei contesti di apprendimento, siano esse positive o negative, attivanti o inibenti, influenzano in modo decisivo la memoria, l'attenzione, l'autoregolazione e i processi decisionali. In tal senso, l'affettività non costituisce soltanto un antecedente del comportamento scolastico, ma ne rappresenta un vettore dinamico, in grado di orientare il *focus* attentivo, attivare strategie metacognitive e sostenere la resilienza nei compiti cognitivamente impegnativi (Di Fabio & Svicher, 2025). Le recenti acquisizioni nell'ambito della psicologia educativa e della pedagogia delle emozioni evidenziano come il successo formativo sia strettamente connesso alla capacità di riconoscere, modulare e integrare le emozioni all'interno del processo di apprendimento, sia sul versante individuale che su quello relazionale (Staniec, Kaczorowska-Spychalska, Kalinska-Kula, & Szczygiel, 2022).

A tal proposito, diventa essenziale riflettere sul ruolo delle emozioni nella costruzione del significato, nella motivazione all'apprendimento e nella formazione dell'identità epistemica del discente. L'ambiente scolastico, lungi dal configurarsi come spazio neutro e asettico, assume le

caratteristiche di un ecosistema emozionale, dove l'interazione tra studenti, docenti e contenuti genera un intreccio complesso di vissuti affettivi che influiscono sull'*engagement*, sulla percezione di autoefficacia e sul senso di appartenenza (Frenzel et al., 2021; Macey, Macey & Hamari, 2022). In tale quadro, la gestione intenzionale delle emozioni, non come oggetto di controllo, ma come risorsa riflessiva e relazionale, diventa elemento imprescindibile per promuovere apprendimenti significativi e duraturi.

È proprio in virtù di tale consapevolezza che il presente paragrafo si propone di indagare, con approccio teorico-argomentativo, le articolazioni tra emozioni e apprendimento, esplorandone le implicazioni sul piano della motivazione e della regolazione cognitiva. A partire da una disamina critica della letteratura più recente, saranno analizzati gli effetti delle emozioni positive e negative sull'attenzione, sulla memoria e sull'intenzionalità didattica, con particolare attenzione agli ambienti immersivi ed alle tecnologie educative avanzate sulla sfera affettiva dello studente.

I.3.1 Il ruolo delle emozioni nei processi cognitivi e motivazionali

La riflessione sulle emozioni nei processi di apprendimento, pur attraversando ambiti disciplinari distinti quali la psicologia, la pedagogia, la filosofia della mente e le neuroscienze, si è negli ultimi anni concentrata sempre più sull'individuazione di modelli teorici in grado di cogliere la complessità del costrutto emotivo all'interno delle dinamiche cognitive e motivazionali (Cipollone, 2021). Questa convergenza teorica e metodologica ha condotto allo sviluppo di una letteratura scientifica vasta e articolata, nella quale le emozioni non sono più considerate come fattori collaterali o interferenti, ma come elementi strutturali e costitutivi dell'esperienza conoscitiva, capaci di influenzare l'attenzione, la memoria, la motivazione, la percezione del sé e, più in generale, il rapporto dell'individuo con il sapere (Dzulkifli & Mustafar, 2013; Limone & Toto, 2022; Vistorte et al., 2024).

La relazione tra emozioni e apprendimento si configura come snodo teorico e operativo di cruciale rilevanza, capace di ridefinire in profondità le modalità attraverso cui il soggetto costruisce conoscenza, attribuisce

significato all'esperienza scolastica e sviluppa la propria identità cognitiva e affettiva. Lungi dall'essere meri epifenomeni soggettivi o ostacoli alla razionalità, gli stati emotivi si configurano oggi, alla luce delle evidenze neuroscientifiche e psicopedagogiche più avanzate, come componenti costitutive e integranti del processo di apprendimento (Hamed & Aljanazrah, 2020; Dubovi, 2022).

In tale prospettiva, diventa centrale interrogarsi sul ruolo delle tecnologie educative non solo come veicoli di contenuti, ma come interfacce affettive, in grado di suscitare e modulare stati emotivi durante l'interazione. La progettazione dell'esperienza utente (*User Experience Design*) deve dunque tener conto della dimensione emozionale come leva di coinvolgimento, motivazione e persistenza nell'apprendimento (Staniec et al., 2022). È in questo contesto che si colloca l'interesse crescente per le *Emotional Technologies*, ossia ambienti didattici digitali capaci di leggere e reagire agli stati emotivi dell'utente grazie all'impiego di sensori biometrici, *biofeedback* e algoritmi adattivi.

I.3.1.1 Teorie di riferimento

Tra le prospettive teoriche maggiormente rappresentative e rilevanti sul piano educativo-didattico, si collocano tre approcci fondamentali: l'approccio evoluzionistico-fisiologico delle emozioni di base, il modello multidimensionale o multimodale delle emozioni, e la teoria accademica delle emozioni. Ciascuna di queste cornici teoriche consente di cogliere specifiche implicazioni pedagogiche e offre strumenti di analisi e intervento didattico differenziati.

Il primo modello, riconducibile alle riflessioni pionieristiche di Charles Darwin e consolidato empiricamente dagli studi successivi di Ekman, propone l'esistenza di un set di emozioni di base, gioia, tristezza, rabbia, paura, sorpresa e disgusto, considerate innate, universali e riconoscibili attraverso specifici pattern fisiologici ed espressivi (Ekman, Sorenson & Friesen, 1969; Eliot & Hirumi, 2019). Tali emozioni, essendo profondamente radicate nella struttura neurobiologica dell'essere umano,

sono concepite come risposte adattive a stimoli ambientali critici e come elementi centrali per la sopravvivenza della specie. L'interesse per questo approccio in ambito didattico deriva dalla possibilità di riconoscere con relativa precisione le emozioni manifestate dagli studenti, ad esempio, tramite espressioni facciali o posture corporee, e di intervenire con strategie di modulazione emotiva coerenti con gli obiettivi di apprendimento (Frenzel et al., 2021).

Parallelamente, l'approccio multidimensionale, noto anche come teoria multimodale delle emozioni, ha introdotto un livello di analisi più articolato, fondato sull'interazione tra tre componenti, quali la valenza (positivo/negativo), il livello di attivazione fisiologica (*arousal*) e la valutazione cognitiva (*appraisal*). In questo quadro teorico, l'emozione non è vista come un'entità discreta e monolitica, ma come il risultato della combinazione dinamica di più dimensioni che concorrono a determinare la risposta soggettiva a uno stimolo interno o esterno (Sacharin, Schlegel & Scherer, 2012; Steinert & Roeser, 2020). Strumenti come la Geneva Emotion Wheel (GEW) consentono una rappresentazione visuale e valutativa degli stati emotivi individuali secondo coordinate valoriali e attivazionali, ponendosi come risorse estremamente utili nella progettazione di ambienti di apprendimento sensibili alla dimensione affettiva. Nell'ambito educativo, questa prospettiva si è dimostrata particolarmente efficace per comprendere come la percezione soggettiva dello stimolo didattico (ad esempio, un'attività laboratoriale o un ambiente immersivo) possa generare un *core affect*, ovvero una sensazione affettiva primaria e pre-riflessiva, in grado di orientare l'intera esperienza di apprendimento (Arslan, Aksahin, Yilmaz, & Ilgın, 2024; Bertheaux et al., 2024).

Infine, la cosiddetta teoria accademica delle emozioni (*academic emotions theory*), sviluppatasi in ambito psicoeducativo, ha proposto una classificazione funzionale delle emozioni esperite dagli studenti durante l'attività scolastica, distinguendo tra emozioni epistemiche (curiosità, confusione, frustrazione), emozioni legate alla realizzazione (orgoglio, vergogna, soddisfazione) ed emozioni sociali (ansia da prestazione, paura

del giudizio, senso di appartenenza) (Eliot & Hirumi, 2019; Dyson, Baek, Howley, Lee, & Fowler, 2024). Questa tassonomia, articolata lungo tre assi fondamentali, valenza, direzione (attività vs risultato) e attivazione, consente di individuare con maggiore precisione le dinamiche affettive che accompagnano le fasi del processo didattico e fornisce indicazioni operative per progettare ambienti di apprendimento capaci di valorizzare le emozioni positive e di attenuare l'impatto di quelle disfunzionali.

Tra le tre prospettive analizzate, la teoria multidimensionale delle emozioni si presta in modo efficace all'operativizzazione in contesti educativi, grazie alla sua struttura bidimensionale e alla possibilità di tradurre le valutazioni soggettive in dati oggettivabili attraverso strumenti di rilevazione psicofisiologica. Tale approccio offre interessanti opportunità anche per la progettazione di ambienti digitali personalizzati, fondati sull'analisi del *core affect* e sull'adattamento in tempo reale dell'interfaccia in funzione dello stato emotivo dell'utente (Staniec et al., 2022). Tuttavia, va sottolineato come l'intrinseca ambiguità e instabilità semantica del costrutto di emozione renda problematica ogni pretesa di oggettivazione assoluta, imponendo un atteggiamento critico e riflessivo rispetto all'uso degli strumenti di misurazione.

In particolare, il contributo della teoria del controllo valutativo (*appraisal theory*) si è rivelato decisivo per comprendere il ruolo delle emozioni nei contesti educativi. Secondo tale prospettiva, le emozioni non sono semplicemente reazioni, ma valutazioni soggettive e contestuali degli eventi, in termini di rilevanza, prevedibilità, controllabilità e congruenza con gli obiettivi personali (Scherer, 2009). In ambito scolastico, questo implica che la risposta emotiva dell'alunno a una situazione di apprendimento, sia essa positiva (entusiasmo, soddisfazione, curiosità) o negativa (ansia, frustrazione, noia), dipende in larga misura dalla percezione soggettiva del compito, dell'ambiente e delle proprie competenze.

È opportuno sottolineare che, nonostante le differenze epistemologiche e metodologiche, tutti e tre gli approcci convergono nel riconoscere l'emozione come interfaccia dinamica tra il soggetto e l'ambiente, come

mediatore cognitivo tra percezione, valutazione e azione. In questa prospettiva integrata, l'emozione si configura come uno stato mentale complesso che, pur originandosi da componenti fisiologiche, assume significato pienamente psicologico e culturale solo attraverso i processi interpretativi e sociali che lo strutturano (Staniec et al., 2022). Tale visione sistemica impone al ricercatore e all'educatore di considerare le emozioni non come variabili interferenti da controllare, bensì come leve euristiche da attivare strategicamente nel processo formativo.

Numerosi studi confermano il legame tra emozioni positive e apprendimento efficace, con particolare riferimento al ruolo del sistema dopaminergico, coinvolto nella mediazione della felicità e nella facilitazione della flessibilità cognitiva, della creatività e del funzionamento della memoria di lavoro (Starkey-Perret, Deledalle, Jeoffrion, & Rowe, 2017; Cipollone, 2021). Stati affettivi positivi, attivati attraverso interazioni significative con ambienti educativi stimolanti, generano senso di sicurezza, autoefficacia e desiderio di esplorazione, costituendo così un potente catalizzatore dell'apprendimento significativo.

La letteratura recente sottolinea come le emozioni influenzino profondamente i processi cognitivi implicati nell'apprendimento, quali l'attenzione, la memoria, la comprensione, la risoluzione di problemi e il pensiero critico. Emozioni positive attivanti, come l'interesse e la curiosità, facilitano l'esplorazione, l'elaborazione profonda e la motivazione intrinseca, mentre emozioni negative ad alta intensità, come l'ansia da prestazione, possono compromettere l'efficienza cognitiva e inibire la partecipazione (Eliot & Hirumi, 2019; Frenzel et al., 2021).

La rilevanza delle emozioni nei contesti educativi è ulteriormente confermata dalle più recenti indagini neuropsicologiche, che hanno evidenziato la correlazione tra stati emotivi positivi e attivazione delle aree cerebrali deputate alla memoria di lavoro, alla flessibilità cognitiva e all'elaborazione metacognitiva (Hariyady et al., 2024; Macey et al., 2022). La felicità, ad esempio, mediata dal circuito dopaminergico, sembra essere associata a una maggiore capacità di *problem solving* creativo, a un incremento della motivazione intrinseca e a una più efficace

autoregolazione dell'attenzione (Kay, 2022; Limone & Toto, 2022). Viceversa, emozioni negative persistenti come l'ansia o la frustrazione possono determinare un sovraccarico cognitivo, un abbassamento della soglia attentiva e una maggiore incidenza di comportamenti di disimpegno scolastico (Meccariello & Mentasti, 2023).

Tale interazione tra emozioni e cognizione non è neutra, ma culturalmente e pedagogicamente mediata. Nei contesti formativi, le emozioni sono suscitate non solo dal contenuto disciplinare, ma dalla relazione educativa, dal clima dell'aula, dal riconoscimento sociale e dal senso di appartenenza alla comunità di apprendimento. In tal senso, le emozioni si configurano come dispositivi relazionali e simbolici, che influenzano non solo l'efficacia dell'apprendimento, ma la qualità complessiva dell'esperienza educativa vissuta dagli studenti (Dyson et al., 2024)

Le implicazioni pedagogiche di tali evidenze sono profonde. Comprendere la dimensione emozionale dell'apprendimento significa assumere una postura educativa in grado di valorizzare le componenti affettive della conoscenza, di progettare interventi personalizzati e di costruire ambienti che favoriscano il benessere emotivo come condizione necessaria per l'attivazione del potenziale cognitivo. In tal senso, emerge una visione del soggetto in apprendimento non più scissa tra razionalità e affettività, ma concepita nella sua unità dinamica e integrata, dove emozione e cognizione si co-costruiscono nel fluire dell'esperienza educativa (Frenzel et al., 2021).

Alla luce di tali evidenze, l'emozione appare dunque non solo come precursore dell'atto cognitivo, ma come sua costante modulazione interna, una matrice dinamica che configura il modo in cui l'informazione viene selezionata, codificata, conservata e trasformata in conoscenza. In tal senso, appare utile richiamare i contributi di Deng & Poole (2010), i quali sottolineano come le emozioni costituiscano l'impalcatura affettiva della memoria autobiografica e della costruzione del significato personale dell'esperienza. Tale visione è stata ulteriormente consolidata da studi che dimostrano il legame tra emozioni positive e rafforzamento sinaptico nei

circuiti neurali dell'apprendimento (Makkan, Brosens & Kruger, 2020), delineando un quadro in cui l'apprendere è, a tutti gli effetti, un atto profondamente emotivo, oltre che cognitivo.

Questa interdipendenza profonda tra dimensione affettiva e processi cognitivi si riflette anche nel rapporto tra emozioni e motivazione, che rappresenta uno degli snodi concettuali più rilevanti nella ricerca educativa contemporanea (Natalini, 2022; Arslan et al., 2024). Le emozioni, infatti, non solo influenzano la direzione e l'intensità della motivazione, ma ne costituiscono una componente strutturale, orientando l'individuo verso obiettivi percepiti come significativi e attivando risorse attentive e comportamentali finalizzate al loro raggiungimento (Dyson et al., 2024). In particolare, la distinzione tra motivazione intrinseca ed estrinseca, già formulata nei modelli classici dell'autodeterminazione, trova nelle emozioni un vettore interpretativo decisivo. Emozioni come la curiosità, il senso di sfida e la soddisfazione favoriscono processi autodiretti e intenzionali, mentre emozioni come l'ansia da valutazione o la paura del fallimento tendono ad attivare meccanismi difensivi, comportamenti di evitamento o di mera esecuzione strumentale (Noteborn, Carbonell, Dailey-Hebert, & Wim, 2012; Vistorte et al., 2024).

Proprio nell'ambito scolastico, l'analisi delle emozioni assume un valore strategico, poiché consente di esplorare con maggiore precisione le variabili che incidono sulla qualità dell'*engagement* e sulla costruzione dell'identità dell'apprendente. Come osservato da Meccariello e Mentasti (2023), la percezione emotiva che lo studente ha del compito, dell'ambiente e della relazione con il docente costituisce un indicatore predittivo della partecipazione attiva e dell'efficacia dell'apprendimento. A tal proposito, le teorie accademiche delle emozioni offrono un'utile lente di lettura per analizzare come differenti assetti emotivi, siano essi di orientamento epistemico, sociale o autorealizzativo, influenzino la disposizione cognitiva e l'intenzionalità dell'azione formativa (Eliot & Hirumi, 2019).

In un'ottica più operativa, l'integrazione delle dimensioni affettive nella progettazione didattica non può prescindere da una rilevazione sistematica e formalizzata delle emozioni esperite dagli studenti. In questo senso, gli

strumenti di misurazione delle emozioni, come ad esempio il test PANAS, si configurano non solo come dispositivi valutativi, ma come catalizzatori di una didattica consapevole delle dimensioni latenti del vissuto formativo (Sacharin et al., 2012; Di Fabio & Svicher, 2025). Il ricorso a strumenti in grado di quantificare gli stati affettivi attraverso la valenza e l'*arousal* rappresenta un primo passo verso la personalizzazione dei percorsi di apprendimento, dove la dimensione emotiva diventa non più una variabile occulta, ma un elemento fondante della relazione educativa.

È in questo contesto che va riletta la crescente attenzione della ricerca internazionale verso ambienti formativi digitali che siano non solo interattivi, ma anche emotivamente responsivi. Come evidenziato da Muscarà et al., (2024), l'evoluzione delle tecnologie didattiche, e in particolare l'avvento di interfacce immersive e adattive, impone un ripensamento della funzione pedagogica dell'ambiente, non più inteso come contenitore neutro, ma come attore relazionale capace di evocare, stimolare e modulare stati emotivi. In tal senso, l'educazione alle emozioni e con le emozioni non può più essere intesa come competenza trasversale, ma come asse strategico dell'azione didattica, da integrare nei curricoli, nelle metodologie e nella progettazione degli ambienti digitali (Bilotti, Campitiello, Todino, & Sibilio, 2023; Hariyady et al., 2024).

L'impostazione teorica che riconosce all'emozione il ruolo di vettore cognitivo ed epistemico appare oggi imprescindibile anche nell'ambito delle politiche educative internazionali. Il documento programmatico dell'ONU (2015), nell'ambito degli Obiettivi di Sviluppo Sostenibile, include tra le priorità il benessere psicologico e la qualità della partecipazione emotiva nei contesti di apprendimento, suggerendo che l'equità e l'inclusione non possono prescindere da una alfabetizzazione emozionale diffusa.

A partire da tali sollecitazioni, diviene quindi necessario ripensare il concetto stesso di competenza, non più limitato a saperi dichiarativi o procedurali, ma esteso alla capacità di gestire efficacemente i propri stati interni, di leggere le emozioni altrui e di costruire ambienti emotivamente stimolanti. Questo approccio appare tanto più urgente quanto più si consolida il paradigma della didattica digitale integrata, la quale, se non

supportata da un'adeguata riflessione teorica sulle emozioni, rischia di generare ambienti disumanizzanti, caratterizzati da distacco, disorientamento e sovraccarico cognitivo (Steinert & Roeser, 2020; Serrano-Puche, 2015).

L'integrazione tra componente affettiva e cognitiva non costituisce una semplice sovrapposizione di livelli funzionali distinti, bensì una struttura sinergica e co-costitutiva del processo di apprendimento. Le evidenze neuroscientifiche e pedagogiche convergono nel ritenere che la dimensione emozionale non sia solo un correlato del comportamento cognitivo, ma un fattore generativo di traiettorie motivazionali e pattern decisionali (Deng & Poole, 2010; Vandercammen, Hofmans, & Theuns, 2014). L'apprendere, dunque, non può essere ricondotto a un processo neutro o asettico. Ogni atto conoscitivo si radica, si colora e si struttura a partire da un sentire, da un'intenzionalità affettiva che orienta l'attenzione, la memoria, la percezione del sé e dell'ambiente.

Tale consapevolezza implica una revisione epistemologica e metodologica dell'intera impalcatura didattica. Se è vero che le emozioni agiscono come catalizzatori o inibitori del sapere, allora le pratiche educative devono potersi confrontare con il compito di modellare ambienti e relazioni che valorizzino la dimensione emozionale non come fattore accessorio, ma come asse portante della progettazione formativa. La sfida non risiede soltanto nella rilevazione delle emozioni, attraverso strumenti standardizzati come il PANAS o la Geneva Emotion Wheel, bensì nella loro trasformazione in leve pedagogiche, capaci di promuovere benessere, autoregolazione, curiosità epistemica e *agency*.

La complessità del vissuto emotivo, tuttavia, richiede che l'intervento didattico sia sfumato e differenziato, capace di accogliere la molteplicità dei vissuti individuali, delle identità in costruzione, delle biografie scolastiche spesso segnate da fratture, discontinuità e forme di demotivazione latente. Come sottolineano Frenzel et al., (2021), la sfida dell'educazione contemporanea non è solo quella di insegnare a conoscere, ma di educare a sentire, ovvero a riconoscere, nominare, gestire e trasformare le proprie emozioni in apprendimenti riflessivi.

In questa prospettiva il docente è chiamato a esercitare un ruolo di mediatore emozionale, capace di leggere i segnali affettivi impliciti nella relazione d'aula, di anticipare i nodi critici emotivi nei percorsi di apprendimento e di proporre strategie didattiche coerenti con i bisogni affettivi degli studenti. Tale funzione si rivela ancora più cruciale nei contesti digitali, dove la mediazione tecnologica tende a smaterializzare i corpi e ad attenuare gli indicatori non verbali della comunicazione emotiva. Per questa ragione, come osservano Staniec et al. (2022), l'*emotional design* degli ambienti digitali deve essere pensato non solo in termini ergonomici e funzionali, ma anche affettivi e relazionali, integrando *feedback* emozionali, contenuti coinvolgenti e strutture narrative capaci di evocare esperienze sensoriali e riflessive.

Il ruolo delle emozioni nei processi cognitivi e motivazionali non può più essere compreso alla luce di dicotomie superate tra razionalità e affettività. Le teorie contemporanee restituiscono un'immagine dell'apprendimento come processo incarnato, affettivamente orientato, culturalmente situato. Lungi dall'essere elementi di disturbo, le emozioni si rivelano architravi fondamentali del pensiero, del comportamento motivato e dell'agire educativo. Solo assumendo questa prospettiva integrata sarà possibile progettare ambienti e pratiche didattiche che non solo informano, ma anche trasformano e coinvolgono profondamente chi apprende.

La riflessione teorica sulle emozioni nei processi cognitivi e motivazionali impone una riformulazione profonda del paradigma educativo. Le emozioni non sono soltanto oggetto di studio o misurazione, ma matrice generativa dell'apprendimento, dimensione fondativa della relazione educativa e vettore trasformativo dell'esperienza formativa. In tal senso, la loro presenza consapevole e progettata rappresenta non solo una risorsa, ma una necessità irrinunciabile per ogni pratica educativa orientata allo sviluppo integrale della persona.

I.3.2 Emozioni positive, attenzione e memoria

All'interno dello spettro che definisce le dinamiche affettive implicate nei processi di apprendimento, le emozioni positive rivestono una funzione strategica, in quanto capaci di attivare risorse cognitive, incrementare il livello di attenzione selettiva e favorire la codifica efficace delle informazioni nella memoria a lungo termine. Contrariamente a una tradizione pedagogica che ha per lungo tempo privilegiato l'oggettività e la neutralità emotiva come condizioni ideali del pensare razionale, le più recenti acquisizioni neuroscientifiche e psicopedagogiche hanno messo in luce come gli stati emotivi di valenza positiva, quali curiosità, entusiasmo, interesse e gioia, siano correlati a un miglioramento sostanziale delle prestazioni cognitive e della resilienza nei compiti scolastici complessi (Frenzel et al., 2021; Cipollone, 2021; Dyson et al., 2024).

Il legame tra emozioni positive, attenzione e memoria risulta tutt'altro che lineare, ma si configura come un intreccio dinamico e reciproco, in cui ciascuna componente modula e potenzia l'altra. Le emozioni positive, infatti, ampliano l'ampiezza del focus attentivo (*broaden-and-build theory*), facilitano l'emergere di processi cognitivi flessibili e favoriscono l'associazione semantica tra concetti, rendendo la memorizzazione più significativa e stabile (Fredrickson, 2004). In questo quadro, le emozioni non solo predispongono all'apprendimento, ma ne costituiscono una parte integrante, contribuendo alla costruzione del significato attraverso l'attivazione simultanea di reti neurali implicate nell'elaborazione affettiva e cognitiva.

Particolarmente rilevante, in tal senso, risulta l'analisi dell'interazione tra emozioni positive e motivazione intrinseca, laddove quest'ultima si configura non come semplice spinta ad apprendere, ma come desiderio sostenuto di esplorare, comprendere e attribuire senso. Le emozioni positive rinforzano il ciclo autoregolativo dell'apprendimento, innescando comportamenti orientati alla padronanza, alla perseveranza e alla riflessione metacognitiva (Macey et al., 2022; Noteborn et al., 2012). Tali effetti risultano ancor più significativi in ambienti educativi caratterizzati da

tecnologie immersive, nei quali l'esperienza sensoriale amplificata e la possibilità di *agency* personale costituiscono leve motivazionali centrali per l'ingaggio attivo del discente (Vandercammen et al., 2014).

A partire da tali premesse teoriche, il presente paragrafo si propone di approfondire il ruolo delle emozioni positive nei processi attentivi e mnestici, con uno specifico focus sul loro impatto differenziale in relazione alla motivazione intrinseca ed estrinseca. L'obiettivo è delineare un quadro articolato che evidenzi come la regolazione affettiva non rappresenti un elemento accessorio, bensì una componente strutturale e strategica della progettazione didattica orientata all'apprendimento significativo.

I.3.2.1 Emozioni positive e processi cognitivi: un'interdipendenza complessa

La riflessione sulle emozioni positive in quanto fattori abilitanti l'apprendimento rappresenta un nodo cruciale per comprendere i processi cognitivi implicati nella costruzione della conoscenza. Gli stati emotivi favorevoli, infatti, non si limitano a produrre un benessere generale, ma attivano specifici circuiti neurofisiologici che incidono profondamente sull'attenzione selettiva, sulla memoria di lavoro e sulla capacità di elaborazione strategica dell'informazione. Come già postulato dalla teoria delle emozioni di base (Eliot & Hirumi, 2019), la predisposizione neurobiologica dell'individuo ad esperire emozioni piacevoli quali gioia, soddisfazione e curiosità si lega a un incremento nella disponibilità attentiva e a una maggiore capacità di manipolare cognitivamente i contenuti appresi.

In tale prospettiva, appare di particolare rilievo il contributo di Dzulkifli e Mustafar (2013), i quali evidenziano come l'attivazione di emozioni positive faciliti la codifica e il recupero delle informazioni, migliorando la funzione mnemonica e riducendo i fenomeni di interferenza semantica. L'effetto delle emozioni sulla memoria viene interpretato attraverso il paradigma della congruenza affettiva, secondo cui i ricordi vengono più facilmente richiamati quando l'umore presente è coerente con quello sperimentato durante l'apprendimento. Tale meccanismo, riconducibile

alla teoria dell'elaborazione cognitiva affettivamente mediata, trova conferma anche nelle recenti ricerche neuroscientifiche che mostrano come le emozioni positive inneschino il rilascio di dopamina e serotonina, neurotrasmettitori associati al consolidamento mnemonico e alla plasticità sinaptica (Fredrickson, 2001).

Al contempo, le emozioni positive si configurano come catalizzatori dell'attenzione focalizzata, una componente cognitiva essenziale per l'apprendimento profondo. Il ruolo dell'attenzione, infatti, non si esaurisce nella semplice selezione degli stimoli, ma assume una funzione ordinatrice e organizzativa delle rappresentazioni mentali, secondo un processo gerarchico che privilegia gli input affettivamente rilevanti. Secondo Deng & Poole (2010), la presenza di emozioni positive stimola la motivazione all'esplorazione e all'approfondimento, attivando modalità cognitive flessibili e generative. Tale affermazione si fonda sulla distinzione tra attenzione esogena e attenzione endogena: mentre la prima è guidata da stimoli ambientali, la seconda dipende da processi interni motivazionali che sono fortemente influenzati dallo stato emotivo del soggetto (Somarathna, Bednarz, & Mohammadi, 2022).

In questa direzione, i lavori di Sacharin et al. (2012) approfondiscono ulteriormente la relazione tra valenza emozionale e *arousal* nel determinare l'efficienza attentiva. Le emozioni positive con valenza elevata e *arousal* medio-alto risultano particolarmente efficaci nel favorire un *engagement* cognitivo sostenuto, in quanto generano una combinazione ottimale tra attivazione fisiologica e chiarezza percettiva. Si tratta di un equilibrio delicato che, se interrotto da stati emotivi negativi o da livelli di *arousal* troppo elevati, può compromettere l'elaborazione cognitiva, provocando effetti di saturazione o blocco attentivo. Inoltre, il modello della Geneva Emotion Wheel, ripreso nello stesso contributo, consente di rappresentare la distribuzione delle emozioni in un piano bidimensionale, offrendo uno strumento analitico per la valutazione dell'impatto emozionale sugli apprendimenti.

Da un punto di vista applicativo, tali evidenze suggeriscono che la progettazione didattica debba tenere conto non solo degli obiettivi cognitivi,

ma anche delle dinamiche affettive che attraversano l'esperienza educativa. La didattica orientata al benessere emotivo, spesso sottovalutata nei contesti formativi tradizionali, assume qui una nuova centralità epistemologica, nella misura in cui le emozioni non sono più considerate come fattori di disturbo, bensì come componenti strutturali dell'apprendimento. In tal senso, gli ambienti educativi che promuovono un clima positivo e sicuro sono in grado di facilitare l'acquisizione di contenuti complessi, potenziando i processi di memorizzazione e generalizzazione (Kay, 2022).

Infine, la questione del nesso tra emozioni positive e memoria si intreccia inevitabilmente con le nuove tecnologie didattiche e con le dinamiche interattive che esse generano. Le ricerche di Macey et al., (2022) mostrano come l'utilizzo di ambienti digitali gamificati, che inducono emozioni come entusiasmo e curiosità, sia in grado di amplificare la capacità di attenzione sostenuta e di favorire una memoria dichiarativa più duratura. Tali risultati aprono a scenari di forte innovazione pedagogica, in cui l'analisi delle risposte emotive degli studenti può diventare un indicatore strategico per l'ottimizzazione dei percorsi di insegnamento-apprendimento.

Alla luce di quanto sopra esposto, è possibile sostenere che le emozioni positive agiscano non soltanto da catalizzatori cognitivi, ma anche da organizzatori neuropsicologici dell'esperienza di apprendimento. Il contributo di Eliot e Hirumi (2019) evidenzia in tal senso l'interconnessione tra affettività, motivazione e apprendimento, sottolineando come stati emozionali positivi facilitino l'instaurarsi di processi metacognitivi e riflessivi, che a loro volta potenziano la capacità del soggetto di regolare volontariamente l'attenzione e di selezionare strategie efficaci di *problem solving*. In questa prospettiva, le emozioni si configurano come una dimensione profondamente relazionale e dinamica, in grado di mediare costantemente tra i bisogni cognitivi e quelli motivazionali dell'individuo.

Analogamente, l'interazione tra emozioni positive e attenzione appare particolarmente rilevante nei contesti educativi mediati dalle tecnologie. Secondo Staniec et al. (2022), l'uso di interfacce intuitive e *digital experience* ottimizzate sul piano emozionale favorisce una condizione di

flow, ovvero di immersione totale e gratificante nell'attività, che migliora sensibilmente la focalizzazione attentiva e la ritenzione delle informazioni. L'attenzione, pertanto, si configura non più come una risorsa fissa da distribuire in modo uniforme, ma come una funzione modulabile e intensificabile in relazione al vissuto emotivo generato dall'ambiente di apprendimento.

In particolare, le emozioni positive rafforzerebbero la memoria di lavoro, intesa come sistema temporaneo di manipolazione dell'informazione, consentendo un'elaborazione più profonda dei contenuti e un maggiore controllo sullo *shift* attentivo (LaBar & Cabeza, 2006). Laddove le emozioni negative tendono a ridurre la flessibilità cognitiva e a focalizzare rigidamente l'attenzione su stimoli minacciosi o disturbanti, le emozioni positive invece ampliano il campo percettivo e favoriscono una visione globale dei problemi (Gupta, 2019).

Non si può inoltre trascurare il ruolo delle esperienze emozionali ripetute nel potenziamento dei circuiti neurali legati alla memoria. Secondo Deng e Poole (2010), le emozioni positive sperimentate con costanza in ambienti di apprendimento digitalizzati, in particolare in quelli che integrano elementi interattivi e gamificati, concorrono alla costruzione di tracce mnestiche resilienti e facilmente riattivabili in situazioni successive. Questo aspetto risulta particolarmente significativo per la progettazione di ambienti educativi sostenibili, nei quali l'emozione non venga ridotta a semplice corollario dell'azione didattica, ma venga assunta come principio costitutivo della cognizione.

In conclusione, il paradigma che emerge dalla letteratura più recente impone una revisione sostanziale delle tradizionali dicotomie tra cognizione e affettività. L'apprendimento efficace non può prescindere da una integrazione funzionale delle emozioni positive, intese come strumenti per la regolazione dei processi attentivi e mnemonici (Somarathna et al., 2022; Macey et al., 2022). In questo senso, il valore pedagogico delle emozioni risiede nella loro capacità di orientare l'attività mentale, di consolidare i percorsi di significazione e di rendere l'esperienza formativa autenticamente trasformativa.

I.3.2.2 Impatto su motivazione intrinseca/estrinseca

La relazione tra emozioni positive e motivazione è stata oggetto di crescente attenzione teorica ed empirica, in virtù della sua rilevanza nei processi di autoregolazione dell'apprendimento, nella persistenza nei compiti e nella costruzione di un atteggiamento proattivo. Nella letteratura di riferimento si distingue, in tal senso, la motivazione intrinseca, che si fonda sull'interesse e sul piacere derivanti dall'attività in sé, dalla motivazione estrinseca, orientata invece al raggiungimento di risultati esterni all'attività, come premi, approvazione sociale o risultati scolastici (Bartolucci, Batini, & Scierri, 2018). Le emozioni positive, in particolare, sembrano giocare un ruolo cruciale nel potenziamento della prima, in quanto attivano meccanismi di esplorazione, curiosità e *engagement* sostenibile (Vandercammen et al., 2014).

Il benessere soggettivo scolastico non si limita alla sola assenza di emozioni negative, ma si configura piuttosto come una condizione psicologica caratterizzata dalla presenza di emozioni positive, che alimentano l'autoefficacia percepita, la resilienza e, in ultima istanza, la motivazione all'apprendimento. In questa direzione, anche Eliot e Hirumi (2019) evidenziano il ruolo di alcuni stati emotivi come la curiosità e l'interesse, nel sostenere il coinvolgimento motivazionale, favorendo l'integrazione di nuove conoscenze attraverso processi cognitivi profondi.

In tale quadro, le tecnologie educative, quando progettate in modo emotivamente responsivo, si configurano come strumenti in grado di attivare una motivazione endogena, laddove la dimensione ludica, l'interattività e il *feedback* immediato agiscono da rinforzo positivo (Staniec et al., 2022). In particolare, l'esperienza utente (UX) in ambienti digitali appare strettamente correlata con l'emergere di stati affettivi positivi che, secondo Kay (2022), possono influire direttamente sul valore attribuito al compito, e quindi sull'intenzionalità e la perseveranza.

Nel paradigma neuroeducativo, inoltre, si è consolidata l'idea secondo cui la motivazione intrinseca scaturisca da una disposizione psicologica attivamente sostenuta da un ambiente emotivamente predisposto. La

dimensione affettiva, in tal senso, non opera in maniera accessoria, ma costituisce la matrice dalla quale si originano orientamenti motivazionali durevoli e autoregolati. Esperienze emotive positive, come il senso di competenza, la curiosità o la percezione di autoefficacia, contribuiscono ad attivare meccanismi di attenzione prolungata, nonché una più efficace elaborazione e sedimentazione delle informazioni ((Vandercammen et al., 2014; Meccariello & Mentasti, 2023). In ambienti didattici ove tali condizioni vengono favorite intenzionalmente, si assiste a un progressivo rafforzamento dell'intenzionalità epistemica, che rappresenta uno degli indicatori più solidi della motivazione autodeterminata.

Al contrario, quando l'ambiente formativo è connotato da scarso riconoscimento affettivo o da dinamiche valutative rigide e unidirezionali, prevalgono forme di motivazione estrinseca, subordinate all'ottenimento di premi, approvazioni o all'evitamento della sanzione. Tale impostazione tende a inibire la libertà esplorativa e a depotenziare la capacità dello studente di attribuire significato personale all'oggetto dell'apprendimento (Noteborn et al., 2012). È in questa cornice che si colloca la distinzione funzionale tra *task value* e *task significance*. La prima rappresenta il valore attribuito al compito in funzione di un'utilità percepita, spesso eterodiretta, la seconda, invece, esprime la capacità del soggetto di riconoscere nel compito una corrispondenza con i propri scopi, valori e interessi, attivando una motivazione autentica e proattiva (Eliot & Hirumi, 2019).

È necessario, dunque, superare una concezione lineare e monodirezionale del rapporto tra emozione e apprendimento, per accogliere una visione sistemica in cui le emozioni agiscano simultaneamente da antecedenti, mediatori e conseguenze della motivazione. In altri termini, l'emozione positiva vissuta durante un'esperienza didattica non solo incrementa l'attenzione e la concentrazione (Gupta, 2019), ma retroagisce sullo schema motivazionale dello studente, generando un circolo virtuoso che alimenta, nel tempo, atteggiamenti resilienti, apertura alla complessità e fiducia nel proprio potenziale. La rilevanza di tali dinamiche appare ancora più pregnante nei contesti di apprendimento supportati dalle tecnologie digitali e immersivi, i

quali, se opportunamente progettati, possono stimolare risposte emozionali che fungono da leva per l'*engagement* intrinseco (Macey et al., 2022).

In effetti, l'esperienza immersiva propria degli ambienti di realtà virtuale, lungi dall'essere una mera simulazione sensoriale, può essere letta come una forma di narrazione coinvolgente in grado di attivare strategie di regolazione emozionale durature. Quando l'interazione con l'ambiente virtuale consente allo studente di esperire stati affettivi positivi, quali stupore, meraviglia, soddisfazione o scoperta, si osserva una significativa intensificazione dei livelli di attenzione, accompagnata da un incremento della profondità cognitiva con cui l'informazione viene processata e integrata nella memoria di lungo termine (Ibidem). In tal senso, le *affordance* della tecnologia non costituiscono semplici strumenti, ma diventano vere e proprie condizioni di possibilità per esperienze affettive trasformative, capaci di modificare la traiettoria motivazionale dello studente.

In questo senso, le emozioni positive rappresentano una sorta di energia psicologica che sostiene la perseveranza nello sforzo, anche in assenza di gratificazioni immediate, e favorisce lo sviluppo di un'attitudine riflessiva e di un senso di *agency* rispetto al proprio processo di apprendimento.

In ultima analisi, può essere affermato che ogni progetto formativo autenticamente orientato alla centralità dello studente debba necessariamente tenere conto delle emozioni che attraversano l'esperienza di apprendimento, non soltanto in termini di benessere soggettivo, ma soprattutto come vettori di significato e motivazione. Il compito dell'educazione, in questa prospettiva, non si limita a trasmettere contenuti, ma deve configurarsi come spazio simbolico ed emotivo in cui lo studente possa riconoscersi come soggetto attivo, responsabile e motivato, sostenuto da emozioni positive che alimentano la sua attenzione e rafforzano la sua memoria, nel quadro di una motivazione che nasce dal desiderio di sapere e non dalla necessità di rispondere a stimoli esterni.

La dimensione emozionale, soprattutto nella sua declinazione positiva, si configura come elemento regolatore e modulatore dell'intenzionalità del soggetto, incidendo sia sulla disponibilità all'apprendimento sia sulla

direzione del comportamento motivato. Le emozioni positive, infatti, non solo fungono da attivatori energetici del processo di apprendimento, ma determinano l'orientamento finalizzato dell'attenzione, contribuendo a selezionare e mantenere nel focus cognitivo quegli stimoli che rispondono a un senso di coerenza interna e di valore personale (Frenzel et al., 2021; Gupta, 2019; Vandercammen et al., 2014).

La componente relazionale gioca, a tal riguardo, un ruolo cruciale. Il rapporto educativo, nella misura in cui è capace di essere affettivamente significativo, si configura come cornice generativa di fiducia, sicurezza e apertura emotiva. È all'interno di questa trama relazionale che l'atto dell'apprendere può diventare esperienza soggettivamente rilevante, poiché supportata da un clima emotivo che legittima la vulnerabilità, incoraggia l'espressione dell'interesse e valorizza l'unicità delle traiettorie motivazionali degli studenti (Meccariello & Mentasti, 2023). In tal senso, la motivazione non si limita a rispondere a fattori interni o esterni, ma si sviluppa attraverso un costante dialogo tra mondo affettivo e processi cognitivi, che l'educazione è chiamata ad orchestrare consapevolmente.

Parallelamente, gli ambienti digitali e immersivi, se progettati con attenzione alle dimensioni affettive e relazionali dell'apprendimento, possono costituire potenti catalizzatori della motivazione intrinseca. Come rilevato da Macey et al. (2022), le *affordance* della realtà virtuale permettono di costruire contesti esperienziali che favoriscono l'attivazione emozionale e la regolazione affettiva, con effetti positivi sulla disposizione motivazionale dello studente. Non si tratta, in questo caso, di un semplice effetto di novità o di stimolazione sensoriale, ma di un impatto più profondo, in cui la percezione di immersione e *agency* si traduce in un'accresciuta significatività dell'esperienza e, conseguentemente, in un incremento dell'impegno intrinseco.

Alla luce di tali evidenze, promuovere le emozioni positive non equivale a creare ambienti edulcorati o artificialmente rassicuranti, bensì a strutturare spazi educativi in cui la dimensione affettiva venga riconosciuta nella sua piena dignità metodologica.

I.3.3 Ambienti digitali e regolazione emotiva. Come la VR influenza le emozioni (immersività e senso di *agency*)

Nel contesto della transizione digitale che investe i sistemi educativi contemporanei, l'integrazione di ambienti immersivi come la realtà virtuale (VR) non rappresenta soltanto un'evoluzione tecnica, ma si configura come una profonda ristrutturazione dei paradigmi cognitivi, affettivi e relazionali che regolano l'esperienza dell'apprendimento. In particolare, la VR introduce una nuova sintassi dell'esperienza educativa, caratterizzata da una marcata intensificazione emozionale i cui effetti si riverberano significativamente sui processi di regolazione emotiva. In tale prospettiva, le emozioni non sono da intendersi come reazioni secondarie all'uso delle tecnologie, ma come elementi costitutivi e co-generativi dell'ambiente stesso, capaci di influenzare il rendimento complessivo dello studente (Meccariello & Mentasti, 2023).

La regolazione emotiva, nella sua accezione più complessa, non va ridotta a una semplice gestione della risposta affettiva, ma va compresa come un processo metacognitivo integrato che coinvolge la consapevolezza, l'interpretazione e la modulazione degli stati interni in funzione del compito. Secondo Steinert e Roeser (2020), le emozioni svolgono una funzione epistemica, poiché permettono al soggetto di orientarsi in situazioni di incertezza, stimolando l'elaborazione riflessiva e la valutazione di valore. In ambienti immersivi, questa funzione è amplificata dalla natura esperienziale della VR, che consente agli studenti di immergersi in scenari emotivamente densi, tali da mobilitare risposte affettive profonde, difficilmente attivabili nei contesti didattici convenzionali.

L'immersività tipica degli ambienti VR produce un senso di presenza amplificato che agisce direttamente sulla percezione soggettiva dell'esperienza, modulando le emozioni in modo più intenso rispetto a quanto avviene nei contesti educativi tradizionali (Macey et al., 2022). Questo stato psicologico, definito *sense of presence*, comporta un coinvolgimento multisensoriale che non soltanto stimola una maggiore concentrazione, ma rende l'esperienza più significativa e memorabile, con

evidenti implicazioni sull'elaborazione affettiva e sul rafforzamento della motivazione intrinseca.

Accanto all'immersività, un altro elemento strutturale che concorre alla regolazione emotiva è il senso di *agency*, ossia la percezione di controllo che l'individuo sperimenta nell'interazione con l'ambiente virtuale. Secondo Pekrun (2006), il senso di *agency* è strettamente connesso alla motivazione autodeterminata e al sentimento di autoefficacia, poiché consente allo studente di riconoscersi come soggetto attivo nel processo di costruzione della conoscenza. La percezione di padroneggiare l'ambiente, di essere artefici delle proprie scelte esplorative e di ottenere risposte coerenti alle proprie azioni genera emozioni positive quali soddisfazione, entusiasmo e curiosità (Drigas, Mitsea, & Skianis, 2023). Queste emozioni non sono meri epifenomeni, ma costituiscono catalizzatori di un circolo virtuoso che sostiene l'*engagement* e promuove la regolazione emotiva a lungo termine.

A rafforzare tale prospettiva, la letteratura neuroscientifica e affettiva mostra come l'immersività e il senso di *agency* in ambienti digitali generino risposte emozionali fortemente codificate dal punto di vista neurofisiologico (Pradeep et. al, 2024). Si può parlare di un apprendimento emozionalmente situato, in cui l'ambiente virtuale non solo veicola contenuti cognitivi, ma diviene mediatore della risposta affettiva, stimolando una regolazione consapevole delle emozioni in funzione degli scopi educativi.

Inoltre, si sottolinea come tali dimensioni, immersività e *agency*, siano capaci di incidere anche su parametri fisiologici ed espressivi della risposta emozionale. Studi come quello di Siirtola, Tamminem, Chandra, Ihalapathirana e Röning (2023) mostrano come ambienti VR progettati con criteri emozionalmente intenzionali siano in grado di modificare i livelli di attivazione affettiva (*arousal*) e di valenza emotiva, rilevabili mediante tecnologie biosensoriali e modelli predittivi di *machine learning* (Siirtola, Tamminen, Chandra, Ihalapathirana, & Röning, 2023). In questo quadro, la regolazione emotiva non è più concepita come mera reazione individuale, ma come co-costruzione dinamica tra soggetto e ambiente digitale, in cui l'architettura tecnologica può predisporre scenari affettivamente facilitanti o, al contrario, dissonanti. La qualità di tale co-costruzione dipende da una

molteplicità di fattori quali la congruenza tra obiettivi didattici e stimoli emozionali, la personalizzazione dell'esperienza, la calibratura tra sfida e competenza percepita, ma anche la predisposizione psicologica dello studente all'impegno emotivo e cognitivo (Hariyady et al., 2024).

Anche il Geneva Emotion Wheel elaborato da Sacharin et al. (2012) offre una prospettiva utile per comprendere la complessità dell'esperienza emozionale in ambienti immersivi, evidenziando come le emozioni suscitate non si limitino alle polarità di piacevole/non-piacevole o attivazione/disattivazione, ma si articolino in configurazioni più complesse, talvolta contraddittorie. In ambienti VR, infatti, può accadere che coesistano emozioni ad alta intensità ma a valenza diversa, come eccitazione e disorientamento, o senso di scoperta e lieve ansia, le quali richiedono capacità di regolazione che non tutti gli studenti possiedono in modo spontaneo. È in tale direzione che va intesa la funzione pedagogica dell'ambiente immersivo, non solo come spazio di apprendimento cognitivo, ma come laboratorio emozionale dove il soggetto può apprendere anche a riconoscere, modulare e finalizzare le proprie emozioni al compito (Vistorte et al., 2024).

Tale articolazione richiede una visione pedagogica che riconosca nella realtà virtuale non una semplice variabile indipendente del processo formativo, bensì una forma ambientale totalizzante che interpella profondamente le strutture emozionali dello studente. L'ambiente immersivo, per sua natura, non si limita a offrire contenuti, ma costruisce esperienze di senso, spaziando dal piano sensoriale a quello simbolico, fino a coinvolgere l'identità stessa del soggetto in apprendimento.

L'intensificazione della dimensione affettiva porta con sé il rischio di una sovrastimolazione emotiva non mediata, particolarmente problematica in soggetti con un basso livello di consapevolezza emozionale o con fragilità psicologiche latenti. Come osservano Staniec et al. (2022), la digitalizzazione delle esperienze formative può indurre un'accelerazione emotiva non sempre sostenibile, determinando stati di sovraccarico sensoriale o confusione cognitivo-affettiva. Il principio dell'*emotional pacing*, ovvero della dosatura intenzionale degli stimoli emozionali lungo il

percorso educativo, si configura allora come criterio pedagogico imprescindibile, al fine di evitare effetti regressivi o iper-reattivi.

Se da un lato questi strumenti aprono a possibilità di personalizzazione mai sperimentate prima (Siirtola et al., 2023; Vistorte et al., 2024), dall'altro pongono interrogativi di ordine deontologico, relativi alla *privacy* affettiva, alla trasparenza algoritmica e alla gestione responsabile dell'identità emozionale degli studenti. Il rischio, tutt'altro che remoto, è che la scuola si trasformi in un ambiente di sorveglianza emozionale, in cui la spontaneità venga sacrificata in nome dell'ottimizzazione dell'apprendimento, secondo logiche comportamentiste mascherate da personalizzazione.

Alla luce di ciò, risulta fondamentale delineare una pedagogia della regolazione emozionale in ambienti digitali, che non ceda né all'entusiasmo acritico né al rifiuto tecnofobico, ma sappia articolare un discorso critico, fondato e intenzionale sull'uso della tecnologia immersiva. Una tale pedagogia deve, da un lato, riconoscere il valore delle emozioni come catalizzatori della motivazione intrinseca, del pensiero riflessivo e dell'identità scolastica, dall'altro, deve presidiare l'etica del sentire, evitando che la VR divenga uno strumento manipolativo o performativo, capace di orientare silenziosamente la disposizione emotiva dello studente senza che questi ne abbia piena consapevolezza (Steinert & Roeser, 2020).

L'ambiente VR, in definitiva, si presenta come uno spazio complesso in cui la regolazione emotiva può diventare, se adeguatamente accompagnata, occasione di crescita autentica. Attraverso una progettazione didattica che tenga conto dell'equilibrio tra immersività e *agency*, tra stimolo affettivo e riflessività critica, la realtà virtuale può contribuire a formare soggetti capaci non solo di apprendere contenuti, ma di trasformare le emozioni in risorse euristiche e metacognitive. In questa direzione, il ruolo del docente si riconferma centrale: non come semplice facilitatore tecnico, ma come mediatore emozionale, capace di leggere, interpretare e accompagnare le traiettorie affettive che si articolano all'interno degli ambienti digitali (Staniec et al., 2022).

I.3.4 Implicazioni educative delle emozioni nelle tecnologie immersive. Intenzionalità didattica, *engagement* e senso di appartenenza

L'integrazione di ambienti immersivi nei contesti scolastici e accademici esige un ripensamento epistemologico del paradigma educativo, che tenga conto della centralità delle emozioni nella costruzione di significati, nella generazione del coinvolgimento e nella costituzione dell'identità personale e collettiva dello studente (Frenzel et al., 2021).

Non si tratta più soltanto di progettare ambienti di apprendimento efficaci sul piano dei contenuti, bensì di strutturare esperienze formative che mobilitino il soggetto nella sua interezza, mente, corpo e affettività, all'interno di uno spazio simbolico altamente coinvolgente (Todino, Campitiello, & Di Tore, 2023). In tal senso, la VR introduce un'inedita intensificazione della dimensione emozionale dell'apprendimento, rendendo necessario interrogarsi sulle implicazioni educative che tale intensità comporta. Le emozioni, lungi dall'essere semplici corollari dell'attività didattica, devono essere riconosciute come processi cognitivamente rilevanti e pedagogicamente orientabili, capaci di agire come catalizzatori della motivazione, della riflessione critica e dell'appartenenza al gruppo.

Alla luce di tali considerazioni, si delinea con forza la necessità di un'intenzionalità didattica che sappia governare, e non subire, l'impatto emozionale delle tecnologie immersive. L'atto pedagogico si configura, in questa prospettiva, come una progettazione di ambienti emotivamente significativi, in cui l'esperienza dello studente non sia soltanto esteticamente piacevole o tecnicamente innovativa, ma anche e soprattutto dotata di senso.

In tale quadro, il senso di appartenenza costituisce una delle condizioni più rilevanti per la qualità dell'esperienza educativa in VR. Non si tratta semplicemente di creare presenza tecnologica, ma di favorire un'esperienza intersoggettiva di riconoscimento, di fiducia e di reciprocità. Le tecnologie immersive, infatti, possono rafforzare, oppure compromettere, il tessuto affettivo che sostiene la partecipazione scolastica, a seconda della qualità

delle interazioni che rendono possibile. Le attività collaborative in ambienti immersivi possono accrescere significativamente la coesione del gruppo e la motivazione intrinseca, purché fondate su relazioni significative e su un clima emotivo di sicurezza. In questo senso, la progettazione didattica deve porsi come obiettivo non solo l'apprendimento dei contenuti, ma anche, e forse soprattutto la costruzione di una comunità educativa virtuale, in cui ogni soggetto possa sentirsi parte attiva di un processo comune (Noteborn et al., 2012; Uskali, Rautiainem, Juntunen, Tallavaara, & Hiljanen, 2023).

Un fattore a cui prestare la dovuta considerazione è l'alienazione emozionale, la quale costituisce uno dei rischi più insidiosi nel contesto di utilizzo tipico dell'ambiente immersivo, per sua natura altamente pervasivo. Esso può indurre negli studenti una dislocazione affettiva, generata dall'inadeguatezza tra intensità emozionale percepita e significato attribuito all'esperienza. Quando la VR sollecita emozioni forti, come meraviglia, eccitazione, paura o empatia, senza offrire spazi per la loro elaborazione, può prodursi una frattura tra vissuto soggettivo e contesto formativo, con conseguente smarrimento, ansia o rifiuto. Gli studi di Staniec et al. (2022) mostrano come una regolazione emotiva inefficace in ambienti immersivi possa condurre a un sovraccarico affettivo, che ostacola i processi di apprendimento e indebolisce la motivazione intrinseca. In questi casi, l'esperienza educativa perde la sua funzione generativa, trasformandosi in evento esteticamente rilevante ma pedagogicamente sterile.

Affinché le tecnologie immersive possano generare un *engagement* autentico, è necessario che l'esperienza sia fondata su una chiara cornice intenzionale, capace di orientare le emozioni verso obiettivi formativi coerenti e trasformativi. La pedagogia dell'appartenenza richiede in tal senso una metodologia che riconosca nella relazione, nella narrazione e nella riflessione collettiva le sue principali coordinate operative. Come sottolineano Noteborn et al. (2012), ambienti virtuali dotati di dispositivi collaborativi e spazi di condivisione affettiva favoriscono l'emergere di legami educativi significativi, nei quali le emozioni individuali possono essere elaborate all'interno di un tessuto relazionale denso e inclusivo.

La costruzione di un clima affettivo intenzionale in VR passa attraverso la capacità del docente di progettare interazioni non solo funzionali, ma anche relazionalmente stimolanti, in cui lo studente si senta ascoltato, riconosciuto e valorizzato nel proprio percorso emotivo. Il senso di appartenenza, in tal modo, non è più semplicemente il risultato di una collocazione spaziale in un ambiente virtuale condiviso, ma l'esito di un processo educativo che fa dell'emozione un mediatore della relazione e del sapere. L'appartenenza affettiva diventa, così, un elemento costitutivo dell'identità dello studente all'interno della comunità educativa. Essa non si limita a determinare il livello di partecipazione, ma incide profondamente sulla costruzione del sé e sulla percezione del valore dell'esperienza scolastica.

In conclusione, l'efficacia delle tecnologie immersive non risiede nella loro capacità di generare *engagement* per intensità, ma nella possibilità che tale coinvolgimento sia fondato, consapevole e orientato. Solo un impianto educativo coerente, fondato sull'intenzionalità didattica e sul riconoscimento della dimensione emozionale come motore dell'apprendere, può trasformare la realtà virtuale in una risorsa autentica per la costruzione di ambienti educativi capaci di includere, ispirare e formare. In questa prospettiva, l'*engagement* e il senso di appartenenza non sono semplici effetti collaterali dell'esperienza immersiva, ma suoi esiti desiderabili e intenzionalmente progettati, riflesso di una visione pedagogica che pone al centro la relazione, il significato e la crescita affettiva dello studente.

Capitolo II
Cornice Metodologica

II.1 Obiettivi e Ipotesi di ricerca

L'impostazione metodologica della presente ricerca, coerentemente con il quadro epistemologico di riferimento, si fonda su una metodologia *mixed methods* di tipo sequenziale esplicativo. L'indagine mira a esplorare in che modo l'utilizzo della realtà virtuale immersiva, fruita tramite visori, possa influire sui processi motivazionali, sulle dimensioni emotive e sui risultati di apprendimento degli studenti nelle discipline STEM, con particolare attenzione al nucleo disciplinare della chimica.

L'obiettivo primario consiste, dunque, nel ricostruire l'interazione multilivello tra esperienza immersiva, motivazione e apprendimento, assumendo che l'ambiente virtuale non si limiti a costituire uno strumento tecnologico, bensì un vero e proprio dispositivo epistemico e simbolico, capace di generare forme di ingaggio cognitivo ed emotivo. In tale prospettiva, la ricerca si articola secondo finalità plurime. Da un lato, esplorativa, volta a comprendere le traiettorie motivazionali ed emozionali emergenti dall'uso del visore Pico 4 e della WebApp FutuClass, dall'altro, valutativa, finalizzata a rilevare le variazioni nei profili motivazionali, negli stati affettivi e nelle competenze disciplinari, attraverso strumenti psicometrici standardizzati (AMOS e PANAS), osservazioni sistematiche e prove di profitto.

Gli obiettivi specifici possono essere declinati nella comprensione di quattro nuclei centrali: (a) analizzare l'evoluzione della motivazione intrinseca ed estrinseca, della percezione di autoefficacia e dell'orientamento agli obiettivi di apprendimento; (b) rilevare la modulazione degli stati emotivi, positivi e negativi, attivati dall'esperienza immersiva e ricostruirne l'andamento longitudinale; (c) valutare l'impatto della realtà virtuale sulla comprensione concettuale e sulla capacità applicativa in chimica, mediante prove scritte e pratiche.

A partire da tali obiettivi, le ipotesi di ricerca sono state formulate come segue. Si ipotizza, in primo luogo, H1, che l'impiego della realtà virtuale favorisca un incremento, seppur differenziato, della motivazione allo studio, della chimica, una delle discipline STEM. Si ipotizza, inoltre, H2, che l'esperienza immersiva moduli in maniera significativa il profilo affettivo, incrementando emozioni positive ad alta valenza agentica, quali interesse, determinazione, orgoglio, e riducendo la frequenza e l'intensità di emozioni disforiche quali ansia, nervosismo o senso di inadeguatezza, pur nella consapevolezza di oscillazioni individuali. Una terza ipotesi, H3, concerne la sfera cognitiva ovvero, la realtà virtuale, in quanto ambiente multisensoriale ed esperienziale, è attesa come fattore in grado di facilitare la comprensione dei concetti astratti della chimica, traducendoli in rappresentazioni concrete e manipolabili. Si assume che la triangolazione dei dati quantitativi e qualitativi permetta di restituire un quadro integrato e multilivello, nel quale convergenze e divergenze tra percezioni soggettive e risultati oggettivi possano offrire indicazioni utili per la progettazione di percorsi didattici innovativi e intenzionalmente riflessivi.

II.1.1 Approccio metodologico generale: fondamenti epistemologici e assetto quasi-sperimentale

Nel quadro delle scienze dell'educazione e della didattica sperimentale, l'articolazione del presente disegno di ricerca si fonda sull'integrazione di un approccio quasi-sperimentale con gruppo unico e su una prospettiva metodologica mista, che contempla l'analisi congiunta di dati quantitativi e qualitativi. Tale configurazione è qui giustificata in ragione della natura complessa del fenomeno oggetto d'indagine, ovvero l'impatto dell'impiego della realtà virtuale sull'apprendimento e sulla motivazione in ambito STEM, e dell'esigenza di coniugare rigore empirico e comprensione interpretativa del vissuto formativo.

L'assenza di un gruppo di controllo, spesso considerata una limitazione nei disegni quantitativi classici, è qui esplicitamente giustificata da una duplice esigenza di natura etica e pedagogica, poiché si è voluto garantire

pari opportunità formative a tutti gli studenti, ed inoltre di impianto, metodologico, in quanto l'intenzione era quella di mantenere la coerenza e la continuità relazionale del contesto reale, senza introdurre artificiose separazioni in gruppi di controllo e sperimentali. La struttura del disegno si sviluppa in dieci incontri, in cui si alternano attività teoriche, pratiche, valutative e momenti di raccolta dati. Questo assetto longitudinale ha permesso una osservazione sistematica del cambiamento cognitivo, motivazionale ed emozionale degli studenti, durante l'esperienza immersiva.

La ricerca si colloca nell'alveo del paradigma interpretativo e costruttivista, assumendo che i fenomeni educativi non si lasciano interamente ricondurre a schemi misurativi predittivi, bensì esigono una lettura densa, situata e multidimensionale. Il soggetto in apprendimento è concepito come agente attivo di costruzione del significato, e l'ambiente educativo come un sistema aperto di interazioni, mediato in questo caso da tecnologie immersive a forte impatto simbolico ed esperienziale. In ragione delle assunzioni teorico-metodologiche delineate, si è optato per un disegno quasi-sperimentale a gruppo unico, strutturato mediante la comparazione tra rilevazioni pre-test e post-test e integrato da una rilevazione sistematica finalizzata a monitorare l'evoluzione delle variabili considerate durante l'intero percorso formativo.

II.1.2 Struttura della ricerca *mixed methods*: triangolazione tra dati qualitativi e quantitativi

La complessità del fenomeno oggetto di interesse, ovvero il rapporto tra realtà virtuale, partecipazione motivata e processi di apprendimento, ha reso necessaria l'adozione di una strategia metodologica *mixed methods*, che ha previsto l'integrazione di strumenti quantitativi e qualitativi all'interno di un disegno unitario e coerente. Nello specifico si è adottata una configurazione di tipo sequenziale esplicativo (*explanatory sequential design*), in cui l'interazione tra approcci quantitativi e qualitativi non si

limita a una mera giustapposizione di tecniche, bensì si struttura secondo una logica progressiva e integrativa (Clark & Ivankova, 2015; Piccioli, 2019).

Da un lato, sono stati somministrati strumenti psicometrici validati, come il test AMOS per l'analisi della motivazione e il test PANAS per la rilevazione degli stati affettivi auto-percepiti. Parallelamente si è proceduto a osservazioni sistematiche mediante griglie di osservazione strutturate. Conclusa questa prima fase quantitativa si è proceduto all'analisi statistica, descrittiva e inferenziale, per identificare variazioni, correlazioni e *pattern* significativi e quindi avere una prima valutazione sull'effetto della variabile indipendente, l'uso della VR, sulle variabili dipendenti di nostro interesse, motivazione, emozioni e rendimento. Sulla base degli esiti ottenuti si è dato seguito al *focus group*, strutturando le domande in modo da esplorare i processi sottostanti ai risultati numerici e così raccogliere le dimensioni soggettive dell'esperienza didattica.

Tale impostazione metodologica non è da intendersi come giustapposizione tecnica agli obiettivi esplicitati, bensì come esito di una precisa postura epistemologica che riconosce la necessità di articolare più registri d'indagine per restituire un'immagine quanto più fedele possibile della realtà educativa. In questa logica, la triangolazione dei dati ha assunto una funzione euristica e validante, consentendo di mettere in dialogo indicatori standardizzati, osservazioni strutturate e narrazioni degli studenti, così da elaborare un quadro interpretativo capace di cogliere convergenze, divergenze e profondità latenti. In tale prospettiva, la triangolazione dei dati ha operato come dispositivo di validazione interna, permettendo una forma di convergenza interpretativa tra misure psicometriche standardizzate, evidenze osservative e resoconti discorsivi degli studenti. Tale procedura ha configurato un processo di validazione incrociata fondato sulla coerenza e compatibilità dei risultati emersi dai differenti canali di rilevazione, contribuendo a rafforzare l'affidabilità delle inferenze e la consistenza complessiva del disegno di ricerca, pur in assenza di una componente comparativa (Carter et al., 2014).

Nella sua declinazione operativa, il *design sperimentale* si è sviluppato secondo due fasi temporalmente distinte ma epistemologicamente

interconnesse. La prima fase (QUAN) ha previsto la raccolta sistematica di dati attraverso strumenti strutturati e validati, il test AMOS per la misurazione della motivazione scolastica, il test PANAS per la rilevazione del profilo affettivo, le griglia osservativa per l'analisi situata del comportamento didattico, somministrati in momenti strategicamente collocati (pre e post intervento). Tale fase ha restituito un primo livello di evidenze descrittive e comparative, suscettibili di essere elaborate tramite analisi statistiche di tipo descrittivo ed esplorativo.

Successivamente, in una prospettiva di approfondimento critico e di restituzione densa del vissuto formativo, si è avviata la seconda fase (QUAL), orientata a un *follow-up* di tipo qualitativo. In essa, l'obiettivo non è stato tanto quello di confermare i dati numerici quanto di spiegarli, interpretarli e contestualizzarli all'interno di una cornice esperienziale condivisa, mediante la conduzione del *focus group* con gli studenti. Le dimensioni esplorate in questa fase qualitativa sono state intenzionalmente costruite in funzione delle evidenze emerse nella fase precedente, ad esempio, l'emergere di picchi di motivazione in corrispondenza di specifiche attività immersive, o l'oscillazione emotiva associata al passaggio dalla didattica tradizionale a quella veicolata tramite visore.

In tal modo, il disegno sequenziale esplicativo adottato consente di superare la dicotomia tra dato oggettivo e dato soggettivo, integrando in un unico *frame* interpretativo la misurazione delle variabili educative con la ricostruzione fenomenologica delle dinamiche esperite. La complementarietà dei dati, ottenuta mediante triangolazione metodologica e convergenza di fonti, rafforza la validità del dispositivo di indagine, restituendo un quadro multilivello in cui la voce dei partecipanti, le traiettorie di senso emergenti e le ricadute didattiche si configurano come elementi reciprocamente co-costruiti.

II.1.3 Finalità esplorativa e valutativa

Il disegno della ricerca è orientato secondo una duplice finalità, esplorativa e valutativa, che ne definisce la portata scientifica e pedagogica.

La finalità esplorativa ha guidato l'indagine verso la comprensione dei processi motivazionali e affettivi attivati dall'impiego della realtà virtuale in un contesto disciplinare complesso come l'insegnamento della chimica in una classe prima. In particolare, si è inteso esplorare in che modo l'ambiente immersivo generato dalla WebApp FutuClass, fruita tramite visore Pico 4, potesse incidere sul coinvolgimento, sul senso di efficacia e sull'interesse degli studenti verso i contenuti disciplinari trattati.

Parallelamente, la finalità valutativa ha orientato l'utilizzo di strumenti sistematici per la rilevazione dei cambiamenti prodotti, sia sul piano cognitivo (verifiche scritte e pratiche), sia su quello motivazionale ed emozionale (test pre-post, osservazioni e narrazioni). Il presente lavoro non vuole limitarsi a descrivere i risultati raggiunti ma vorrebbe ambire a divenire occasione generativa per riconsiderare le modalità di insegnamento-apprendimento in ottica innovativa, accessibile e inclusiva. In tal senso, essa ambisce a contribuire alla ridefinizione dell'educazione delle discipline STEM in ambienti didattici innovativi, fondati sulla sinergia tra esperienza sensoriale, motivazione e comprensione facilitata delle discipline.

II.1.4 Limiti metodologici e validità ecologica

Come ogni ricerca che mira ad indagare la realtà e la complessità delle pratiche scolastiche, anche il presente impianto presenta limiti metodologici strutturali, che meritano di essere assunti criticamente senza essere elusi. La scelta di non adottare un gruppo di controllo implica una minore generalizzabilità dei risultati, soprattutto sul piano della causalità statistica. Tuttavia, questa rinuncia è stata bilanciata da una validità ecologica, ovvero dalla possibilità di osservare i fenomeni in un contesto autentico, con dinamiche relazionali e affettive non mediate o artificiosamente determinate dalla formazione di sottogruppi interni alla classa. L'intero processo formativo è stato vissuto come unità integrata, e ciò ha consentito una lettura del cambiamento contestualizzata, situata e dialogica.

La decisione di volgere lo sguardo analitico su un caso singolo, monitorato nel suo divenire, ha restituito una chiara quanto articolata comprensione dei processi formativi, capace di mettere in luce traiettorie individuali e collettive, micro-dinamiche affettive e riflessive, pratiche emergenti e risignificazioni cognitive. In questo senso, il disegno metodologico non si propone come modello generalizzabile in senso statistico, ma come dispositivo riflessivo replicabile per analogia metodologica, fondato sulla coerenza tra strumenti, obiettivi e contesto.

II.2 Contesto e profilo dei partecipanti: La scuola, IIS "Maiorana-Cascino".

Il contesto in cui si è sviluppata la presente indagine è rappresentato da un Istituto Scolastico Secondario di secondo grado, l'IIS "Maiorana-Cascino" di Piazza Armerina (EN), un Istituto di Istruzione Superiore caratterizzato da una consolidata attenzione alle innovazioni didattiche, in modo particolare nell'ambito delle discipline STEM. L'istituto è articolato in più indirizzi di studio, il liceo scientifico, il liceo classico e tre specializzazioni ad indirizzo tecnico-industriale, tra le quali l'indirizzo Chimica e Materiali, connotato da un forte orientamento scientifico. L'Istituto si è dimostrato sin da subito disponibile ad accogliere pratiche educative fondate su un uso critico e consapevole delle tecnologie, manifestando una cultura organizzativa orientata alla sperimentazione metodologica e alla valorizzazione di ambienti di apprendimento non convenzionali.

L'edificio scolastico è dotato di spazi adeguati, infrastrutture tecnologiche aggiornate e una rete informatica efficiente, elementi che hanno costituito prerequisiti fondamentali per l'integrazione della realtà virtuale come strumento di insegnamento. La scuola è stata destinataria di un finanziamento nell'ambito del PNRR "Missione 4 - Istruzione e ricerca - Piano Scuola 4.0 - Linea di investimento 3.2 - Scuola 4.0 - Azione 2 - *Next generation labs* - Laboratori per le professioni digitali del futuro" dal titolo "InnovAzione", attraverso il quale è stato allestito un modernissimo

laboratorio di realtà virtuale e aumentata, collaudato la prima settimana di marzo ‘25 e per la prima volta utilizzato dall’insegnante di chimica che ha preso parte alla seguente sperimentazione.

Tutte le attività si sono svolte all’interno del laboratorio virtuale, dotato anche di lavagna interattiva multimediale (LIM), con funzione di proiezione dello schermo del visore, permettendo così una mediazione continua tra ambiente virtuale e classe reale. La presenza del docente e del ricercatore in aula, unita alla possibilità di osservare in tempo reale l’esperienza vissuta dagli studenti all’interno dell’ambiente immersivo, ha reso possibile una lettura multilivello dei processi didattici in atto, favorendo al contempo un monitoraggio sistematico e non intrusivo.

I visori utilizzati, dispositivi di ultima generazione per la realtà virtuale e la suite studio, ovvero la piattaforma educativa per simulazioni immersive in ambito scientifico, hanno rappresentato non solo uno strumento tecnologico, ma un vero e proprio *education environment*, entro il quale lo studente ha potuto navigare contenuti disciplinari e sperimentare concetti astratti in forma esperienziale e multisensoriale. La combinazione tra infrastruttura fisica e infrastruttura digitale ha reso il contesto scolastico un ecosistema didattico aumentato, capace di supportare una didattica situata, mediata e riflessiva.

II.2.1 Il gruppo classe: caratteristiche, dinamiche e predisposizioni

La classe selezionata per l’intervento era composta da ventiquattro studenti frequentanti la classe prima dell’Istituto Tecnico Industriale indirizzo “Chimica e Materiali”, con un’età media di circa sedici anni. L’adesione dell’intero gruppo alla sperimentazione è stata completa, senza casi di esclusione o ritiro, garantendo così la continuità osservativa e la completezza del ciclo di raccolta dati. Dal punto di vista didattico, la classe si presenta come omogenea in termini di livelli cognitivi e prerequisiti disciplinari, con un grado di eterogeneità limitato per quanto riguarda le competenze scientifiche, ma più marcato sul piano motivazionale e relazionale. All’interno della classe è presente un alunno seguito

dall'insegnante di sostegno con disabilità intellettiva di grado lieve, che ha partecipato a tutte le attività con particolare entusiasmo e motivazione.

Durante la fase preliminare di osservazione, è emersa una relativa familiarità con le tecnologie digitali, sebbene nessuno degli studenti avesse avuto esperienze precedenti di apprendimento con strumenti di realtà virtuale. Ciò ha determinato una curiosità iniziale mista a incertezza, che si è progressivamente trasformata, nel corso del percorso, in un atteggiamento di apertura, coinvolgimento e partecipazione attiva. Tale evoluzione è stata favorita anche dall'effetto novità del dispositivo immersivo, il quale ha agito come catalizzatore di attenzione e motivazione, in particolare nei soggetti inizialmente meno predisposti allo studio della chimica.

Le dinamiche relazionali interne al gruppo si sono rivelate funzionali al successo dell'intervento, aver goduto della presenza di una comunità cooperativa già consolidata ha favorito il supporto reciproco durante le fasi operative, specialmente durante le esercitazioni con il visore e nelle sessioni di *peer-tutoring*. In più occasioni è stato osservato un incremento spontaneo del dialogo disciplinare tra pari, un pre-segno, se vogliamo, di attivazione metacognitiva e di un crescente senso di appartenenza alla comunità di apprendimento. L'ambiente classe, in quanto sistema di relazioni, emozioni e intenzionalità condivise, ha rappresentato un potente fattore abilitante per la piena riuscita del percorso, confermando quanto la dimensione sociale dell'apprendimento non possa mai essere disgiunta da quella cognitiva e affettiva.

II.2.3 Ruolo degli insegnanti e co-progettazione didattica

Elemento fondante dell'intervento sperimentale è stata la sinergia tra docente curricolare e ricercatore, i quali hanno cooperato in ogni fase del processo, dalla progettazione delle attività alla valutazione intermedia e finale. La docente di chimica ha definito le priorità didattiche e selezionato i contenuti in modo tale da definire il senso delle esperienze vissute dagli studenti. Parallelamente, il ricercatore ha curato la dimensione osservativa, la raccolta e l'analisi dei dati, nonché la documentazione riflessiva del

percorso, mantenendo sempre un atteggiamento rispettoso dell'autonomia del contesto scolastico e delle sue regole implicite.

La collaborazione si è concretizzata in una co-progettazione sistematica, che ha permesso di modulare le attività in funzione dei ritmi di apprendimento, dei bisogni rilevati e degli obiettivi valutativi. La docenza non è stata dunque interpretata come esercizio tecnico di erogazione contenutistica, ma come presenza pedagogica situata, capace di leggere le traiettorie cognitive, ed anche affettive, emergenti e di ri-orientare la proposta educativa in modo responsivo. L'intreccio tra gestione didattica, osservazione scientifica e riflessione metacognitiva ha prodotto un ambiente formativo fortemente intenzionale, nel quale tecnologia, relazione e contenuto si sono saldati in un'esperienza significativa.

La presenza costante del ricercatore durante tutte le sessioni ha inoltre garantito una osservazione partecipante discreta ma sistematica, condotta mediante griglie di osservazione pre-strutturate, annotazioni sul campo e rilevazioni post-intervento. Questa integrazione di ruoli, tra chi insegna e chi osserva, tra chi guida e chi decodifica, ha rappresentato una delle caratteristiche metodologiche più rilevanti del progetto, contribuendo a conferire profondità interpretativa alla sperimentazione, e restituendo un modello di lavoro replicabile, pur nella consapevolezza della sua natura situata.

II.3 Ambienti e strumenti della rilevazione empirica

L'ambiente virtuale utilizzato nel presente intervento sperimentale è stato costruito mediante l'impiego del visore Pico 4 *all-in-one*, dispositivo di ultima generazione in grado di offrire un'esperienza immersiva ad alta risoluzione, accompagnato dalla WebApp FutuClass, una piattaforma progettata specificamente per l'apprendimento delle scienze attraverso simulazioni interattive in realtà virtuale. Nello specifico, all'interno della sezione di Chimica, lo studente ha avuto modo di confrontarsi attivamente con i contenuti disciplinari relativi all'unità di apprendimento progettata per l'occasione attraverso una modalità esperienziale e multisensoriale,

toccando virtualmente l'atomo e tutti gli elementi che compongono la materia.

Le *affordance* pedagogiche offerte dal visore VR si manifestano su più livelli, certamente sul cognitivo, poiché favoriscono la comprensione concettuale attraverso la manipolazione visiva di oggetti astratti, ed inoltre su quello emozionale, in quanto generano coinvolgimento, senso di presenza e attivazione affettiva. Ma potremmo anche dire che si manifestano sul piano metacognitivo, dal momento che stimolano processi di autoriflessione sull'apprendimento. In particolare, la possibilità di esplorare l'architettura dell'atomo, simulare il bilanciamento di equazioni chimiche e osservare reazioni virtuali in tempo reale ha consentito agli studenti di trasformare nozioni teoriche in esperienze di apprendimento incarnate, facilitando la costruzione di conoscenza significativa.

Dal punto di vista dell'organizzazione didattica, il visore è stato utilizzato in due modalità distinte ma complementari: a) in forma collettiva tramite proiezione su LIM, per introdurre i contenuti e fornire una guida all'esperienza; b) in forma individuale, per permettere l'esplorazione autonoma all'interno dell'ambiente virtuale. Questa modulazione tra visione condivisa e interazione personale ha favorito una partecipazione distribuita e inclusiva, mitigando le eventuali difficoltà tecniche e valorizzando le differenti modalità cognitive di accesso al sapere scientifico.

II.3.1 Strumenti quantitativi: AMOS e motivazione, PANAS ed emozioni, Griglia per osservazione sistematica e valutazione degli apprendimenti

Per indagare in modo sistematico l'evoluzione dei vissuti motivazionali ed emozionali legati all'esperienza immersiva, sono stati adottati due strumenti psicometrici validati e ampiamente diffusi nella letteratura scientifica nazionale e internazionale: il test AMOS (Abilità Motivazionali e Orientamento allo Studio) e la scala PANAS (*Positive and Negative Affect Schedule - Expanded Form*).

Il test AMOS, somministrato in due momenti (iniziale e finale), ha consentito di rilevare il profilo motivazionale degli studenti, distinguendo

tra orientamento intrinseco, orientamento estrinseco e atteggiamenti passivi. Tale strumento, basato su scala Likert a cinque punti, ha offerto dati comparabili e oggettivabili, fondamentali per misurare l'eventuale incidenza dell'ambiente virtuale sulla perseveranza, sull'interesse e sul senso di autoefficacia percepita. La somministrazione ripetuta ha permesso inoltre un'analisi longitudinale del cambiamento, offrendo uno spaccato evolutivo dei processi motivazionali.

Parallelamente, la scala PANAS è stata impiegata per monitorare la fluttuazione degli stati affettivi percepiti dagli studenti durante il percorso, con particolare attenzione alla comparsa di emozioni positive (entusiasmo, interesse, determinazione) e alla riduzione di quelle negative (irritazione, frustrazione, nervosismo). Questo strumento si è rivelato particolarmente utile per comprendere il ruolo modulatore delle emozioni sull'apprendimento, dimensione centrale nel quadro teorico di riferimento del progetto.

Completano l'assetto quantitativo due strumenti valutativi a carattere sommativo: a) una verifica pratica con l'uso del visore, svolta dallo studente e osservata dal docente tramite LIM, che ha permesso di valutare non solo il livello di competenza, ma anche le strategie risolutive e le modalità operative adottate dagli studenti in situazione immersiva; b) una verifica scritta finale con domande a risposta chiusa e risposte aperte, volta a misurare l'acquisizione dei contenuti disciplinari trattati durante l'UdA.

II.3.2 Strumenti qualitativi: il *focus group*

Alla rilevazione quantitativa si è affiancato un robusto impianto qualitativo, volto a cogliere la dimensione soggettiva, relazionale e processuale dell'esperienza didattica. Per tutte le dieci sessioni è stata utilizzata una griglia di osservazione strutturata, costruita in base a indicatori specifici (partecipazione, collaborazione, coinvolgimento, espressioni verbali e non verbali, posture corporee, gestione dell'interfaccia). Le griglie di osservazione sono state compilate al termine di ogni incontro, hanno permesso di registrare micro-comportamenti

significativi e di identificare *pattern* ricorrenti nella condotta degli studenti, utili per ricostruire l'evoluzione dei processi di apprendimento e coinvolgimento.

Al termine del percorso, è stato realizzato un *focus group* con l'intero gruppo classe, condotto con metodologia semi-strutturata. Gli studenti sono stati invitati a riflettere collettivamente sull'esperienza vissuta, esprimendo giudizi, percezioni, difficoltà incontrate e suggestioni emergenti. Il *focus group* ha fornito una ricca base narrativa per l'interpretazione dei dati quantitativi e per l'emersione di temi trasversali non rilevabili attraverso strumenti standardizzati. Le trascrizioni dell'incontro sono state successivamente sottoposte ad analisi tematica, per individuare nuclei concettuali e dimensioni affettive ricorrenti.

Infine, è stato somministrato un questionario di gradimento a risposta chiusa e aperta, che non è oggetto di attenzione analitica nella presente ricerca, essendo stato un semplice strumento di restituzione esperienziale.

L'insieme degli strumenti impiegati, in sinergia con la triangolazione metodologica descritta nel paragrafo II.2, ha assicurato un certo grado di profondità, ricchezza e coerenza interpretativa all'intera operazione di rilevazione empirica, permettendo una lettura integrata del fenomeno formativo oggetto di studio.

II.4 Strutturazione del percorso didattico-sperimentale. Descrizione analitica delle 10 sessioni

La sperimentazione si è articolata in un modulo didattico di dieci incontri, corrispondenti ad un totale di dieci ore, distribuite su cinque settimane. L'intervento ha ruotato attorno all'Unità di Apprendimento "L'atomo e le reazioni di bilanciamento", strutturata secondo una logica didattica multi-metodologica, fondata sull'integrazione di lezioni frontali, attività laboratoriali in realtà virtuale, momenti di riflessione condivisa e valutazione autentica. Ogni sessione è stata co-progettata e co-gestita insieme alla docente di chimica, in un'ottica dialogica e formativa. La

presenza simultanea di entrambi ha permesso di garantire la continuità didattica e un'osservazione sistematica strutturata.

Sessione 1 - Introduzione dell'UdA, pre-test Amos e Panas

Il primo incontro ha svolto una funzione di avvio orientativo e di calibrazione iniziale delle dimensioni osservate. La docente ha introdotto i concetti chiave dell'UdA, delineando il campo semantico di riferimento (massa atomica, mole, reazioni chimiche, leggi ponderali) e stimolando una prima attivazione cognitiva mediante domande guida e brainstorming. Successivamente, sono state presentate le attività che avrebbero avuto seguito ed in parte le finalità della sperimentazione, illustrando in modo trasparente obiettivi, strumenti e modalità operative. Gli studenti hanno mostrato curiosità, accompagnata da un atteggiamento inizialmente esplorativo ma cauto nei confronti dell'apparato VR.

È stata quindi effettuata la prima somministrazione del test AMOS e del PANAS, in forma cartacea, accompagnata da una breve spiegazione dei punteggi. Infine, è stato introdotto il visore Pico 4 con dimostrazione tecnico-pratica, e condivisa su LIM la schermata iniziale dell'ambiente FutuClass, generando un primo impatto visivo e simbolico.

Sessione 2 - Lezione immersiva guidata: il bilanciamento chimico

Durante il secondo incontro, la classe è stata immersa collettivamente nella prima lezione tematica VR sul bilanciamento delle reazioni chimiche. La docente ha guidato verbalmente l'esperienza mentre la simulazione veniva proiettata in tempo reale tramite *mirroring* su LIM. La sequenza didattica ha seguito uno schema concettuale lineare, integrato da esempi e modelli visivi dinamici.

Gli studenti sono stati incoraggiati a verbalizzare ciò che vedevano, favorendo una decodifica collettiva dell'esperienza. La docente ha riformulato le risposte, collegandole ai concetti affrontati nella lezione introduttiva, e ha promosso momenti di confronto aperto.

Sessione 3 - Esercitazione individuale: esperienza attiva in VR

Nel terzo incontro si è passati alla fruizione individuale dell'ambiente immersivo, all'interno dell'ambiente FutuClass, preceduta da una brevissima dimostrazione d'uso da parte della docente. Ogni studente ha potuto cimentarsi con esercizi mirati sul bilanciamento, attività strutturate come simulazioni interattive e risoluzione di problemi da risolvere mediante il trascinamento di atomi e molecole all'interno dell'ambiente virtuale con un'interfaccia 3D.

Tra una sessione pratica ed un'altra è capitato che osservare la formazione di una comunità di apprendimento parallela, in cui il dispositivo VR ha attivato processi collaborativi analogici, favorendo lo scambio di idee e strategie risolutive tra gli studenti.

Sessione 4 - Immersione tematica: la struttura dell'atomo

La quarta lezione ha proposto una nuova fase immersiva collettiva, incentrata sul tema della struttura atomica. Gli studenti hanno visualizzato modelli tridimensionali di atomi, con orbitali elettronici animati e rappresentazioni simboliche associate. La docente ha proposto domande metacognitive e ipotesi da verificare durante l'esplorazione, rendendo la lezione non solo espositiva, ma investigativa.

La reazione della classe è stata fortemente partecipativa, con studenti che anticipavano concetti, riformulavano definizioni e ponevano interrogativi specifici.

Sessione 5 - Esercitazione immersiva individuale: test emozionale intermedio

La quinta sessione ha replicato lo schema individuale, centrato ora su esercitazioni riguardanti la struttura atomica. Ogni studente ha svolto attività esplorative personalizzate, che richiedevano la ricostruzione di

modelli atomici, la classificazione di particelle subatomiche e l'associazione tra numero atomico e massa.

A fine attività è stato somministrato per la seconda volta il test PANAS, per valutare l'impatto emozionale dell'esperienza immersiva nella sua fase intermedia.

Sessione 6 - Approfondimento multimediale e connessioni interdisciplinari

In questa sessione, il *focus* si è spostato su un approfondimento teorico-multimediale. Sono stati presentati e discussi materiali video di taglio divulgativo, selezionati con cura dalla docente. I contenuti affrontavano concetti già esperiti in VR, ma da una prospettiva narrativo-esplicativa.

Questa attività, erogata attraverso la LIM del laboratorio virtuale, ha stimolato una transcodifica epistemologica, in cui gli studenti hanno potuto confrontare linguaggi differenti (simbolico, iconico, verbale) e riflettere sulle connessioni tra teoria e simulazione. La discussione plenaria ha attivato un dialogo metacognitivo, nel quale sono emerse analogie ma anche qualche difficoltà a compiere trasferimenti concettuali.

Sessioni 7 e 8 - Verifica pratica: osservazione delle competenze in VR

Durante la settima e ottava sessione si è svolta la verifica pratica degli apprendimenti in ambiente immersivo. Ogni studente ha affrontato individualmente un'attività di *problem-solving* strutturata, osservata in tempo reale dalla docente attraverso lo schermo condiviso. Il compito prevedeva il bilanciamento corretto di una reazione complessa e la giustificazione delle scelte effettuate. Conclusa la prova è stato fornito ad ogni studente un *feedback* formativo.

Sessione 9 - Somministrazione post-test Amos e Panas

La nona sessione è stata ampiamente dedicata alla somministrazione del test AMOS e PANAS, permettendo di costruire una mappa evolutiva dei profili motivazionali ed affettivi in termini di variazione pre-post.

Sessione 10 - Conduzione del *focus group*

Durante l'ultimo incontro è stato condotto il *focus group* con tutti i partecipanti, articolato in domande semi-strutturate tese a indagare il senso attribuito all'esperienza, le difficoltà incontrate, gli apprendimenti significativi e i cambiamenti percepiti.

Le narrazioni raccolte hanno fornito materiale prezioso per la successiva analisi tematica, mettendo in luce aspetti emotivi e cognitivi non accessibili tramite strumenti standardizzati. Nello specifico sono state poste domande volte ad approfondire gli aspetti emersi dall'analisi dei dati quantitativi così da poter approfondire o interpretare le discrepanze ed i meccanismi che ne stanno dietro.

Sessione 11 - Valutazione sommativa

Nell'ultima sessione si è svolta la verifica sommativa, scritta, sui contenuti dell'UdA, redatta dalla docente, con domande a risposta chiusa, aperta ed anche qualche esercizio sul bilanciamento. Al termine è stato distribuito il questionario di gradimento, con sezioni chiuse (scala Likert) e aperte, volto a rilevare la soddisfazione complessiva, la chiarezza delle attività, la difficoltà percepita e l'impatto personale dell'esperienza.

L'osservazione conclusiva ha evidenziato un clima disteso e consapevole, con numerose espressioni di orgoglio, soddisfazione e senso di riuscita. È stato evidente il passaggio da un apprendimento subìto ad un apprendimento agito e tematizzato. La fase finale ha dunque rappresentato una ricomposizione riflessiva dell'intero processo formativo, chiudendo il cerchio metodologico tra immersione, osservazione e restituzione.

Capitolo III
Analisi e interpretazione dei dati

III.1 AMOS - Abilità e Motivazione allo Studio

All'interno della cornice metodologica delineata, l'impiego del questionario AMOS, Abilità e Motivazione allo Studio, (De Beni et al., 2014) ha assunto una funzione centrale nella valutazione dell'impatto dell'intervento didattico basato sull'impiego della realtà virtuale immersiva. Nello specifico, è stata adottata la sezione denominata Questionario sulle Convinzioni (QC), mirata a rilevare rappresentazioni e credenze dello studente rispetto a dimensioni trasversali quali l'intelligenza, la personalità, la fiducia nelle proprie capacità cognitive e socio-relazionali, la percezione della propria efficacia nello studio e l'orientamento verso differenti obiettivi di apprendimento.

L'articolazione del questionario, coerente con l'impianto teorico-metodologico della psicologia motivazionale e metacognitiva, consente di mappare sei dimensioni latenti:

1. Teoria dell'intelligenza (entitaria vs. incrementale),
2. Teoria della personalità (immutabilità vs. modificabilità del sé),
3. Fiducia nella propria intelligenza,
4. Fiducia nella propria personalità,
5. Percezione delle proprie abilità di studio,
6. Obiettivi di apprendimento (prestazione vs. padronanza).

È rilevante sottolineare che lo strumento, nella sua versione standardizzata, restituisce un *report* sintetico a interpretazione proprietaria, limitando l'accesso alle risposte grezze dei singoli item e impedendo di conseguenza l'elaborazione di analisi fattoriali o di stima diretta della consistenza interna delle sottoscale. Tuttavia, ciascun report restituisce valori aggregati numerici per ciascuna dimensione, affiancati da indicatori qualitativi (es. "sufficiente", "molto alto", "non orientato"),

calcolati secondo algoritmi interni validati. Ciò ha consentito comunque l'estrazione di dati numerici trattabili statisticamente, coerentemente con il disegno quasi-sperimentale della ricerca.

La somministrazione dello strumento è avvenuta in due tempi, T1 (Pre-intervento) al termine della lezione introduttiva, prima dell'avvio del percorso in realtà virtuale e T2 (Post-intervento) durante la decima e ultima lezione, al termine dell'intero ciclo sperimentale.

Dei 24 studenti partecipanti, 23 hanno completato entrambi i questionari in maniera conforme, rendendo possibile un'analisi pre-post su dati appaiati. I punteggi sono stati organizzati in un file di lavoro strutturato su dodici colonne (sei dimensioni per due tempi) e sottoposti a verifica di normalità (test di Shapiro-Wilk), in modo da determinare l'idoneità dei dati all'impiego di test parametrici.

I risultati della verifica di normalità hanno mostrato una distribuzione approssimativamente normale per cinque delle sei dimensioni, rendendo appropriato l'impiego del t-test per campioni appaiati. Unica eccezione è risultata la variabile "Obiettivi di apprendimento", per la quale è stata rilevata una distribuzione significativamente non normale ($p<0.05$ in entrambi i tempi), rendendo necessaria l'applicazione del test non parametrico di Wilcoxon per dati appaiati.

Procedura analitica

L'analisi è stata condotta mediante il software JASP (versione 0.19.3), selezionato in quanto open-source, *user-friendly* e pienamente compatibile con procedure di statistica descrittiva e inferenziale su piccole-medie dimensioni campionarie. I dati sono stati caricati come matrice completa per i 23 partecipanti con dati validi in entrambi i tempi di osservazione. Per ciascuna dimensione, sono stati calcolati la media aritmetica pre e post, la differenza media (Δ) tra T2 e T1, il valore del *p-value*, per determinare la significatività statistica, la visualizzazione mediante *boxplot* e grafici a barre che seguiranno nel presente capitolo.

Esiti dell'analisi

I risultati ottenuti possono essere considerati coerenti con le ipotesi di partenza, pur non raggiungendo, in alcun caso, la soglia di significatività statistica ($p < .05$). Si riportano di seguito i dati in forma sintetica:

Dimensione	*Test*	*Media Pre*	*Media Post*	*Δ Media*	*p-value*	*Esito*
Teoria dell'intelligenza	T-test	34.70	34.83	+0.13	0.8796	Non significativo
Teoria della personalità	T-test	22.61	23.17	+0.57	0.6546	Non significativo
Fiducia nella propria intelligenza	T-test	9.74	9.96	+0.22	0.6721	Non significativo
Fiducia nella propria personalità	T-test	8.39	8.70	+0.30	0.5829	Non significativo
Percezione delle abilità	T-test	17.96	18.17	+0.22	0.6875	Non significativo
Obiettivi di apprendimento	Wilcoxon	2.04	2.30	+0.26	0.3529	Non significativo

Tabella 1 - Statistiche descrittive Test AMOS

Da un punto di vista puramente numerico, si osserva in tutte le dimensioni una lieve tendenza migliorativa dei punteggi medi post-intervento rispetto ai valori pre-intervento. In particolare, le dimensioni "Teoria della personalità", "Fiducia nella personalità" e "Obiettivi di apprendimento" mostrano un incremento più marcato, pur senza raggiungere significatività. Questo trend, sebbene statisticamente non conclusivo, potrebbe suggerire un effetto potenzialmente positivo dell'esperienza immersiva sulla percezione di modificabilità del sé, sul senso di efficacia personale e su un maggiore orientamento verso obiettivi misti (prestazione e padronanza).

Tuttavia, la modesta entità delle variazioni e l'assenza di significatività suggeriscono cautela interpretativa. Tale esito può essere ricondotto a diversi fattori metodologici, uno tra tutti l'assenza di un gruppo di controllo, che limita la possibilità di isolare l'effetto causale dell'intervento, oppure ancora la brevità dell'esposizione (l'intervento è limitato a 10 lezioni), l'eterogeneità interindividuale (forti differenze iniziali tra studenti, come emerso anche nei report qualitativi) e non per ultimo la possibile

insensibilità dello strumento nel rilevare micro-variazioni in tempi brevi, soprattutto in presenza di punteggi iniziali già medio-alti (fenomeno di *ceiling effect*).

Considerazioni metodologiche

Dal punto di vista della coerenza metodologica, l'impiego dello strumento AMOS, pur con le limitazioni derivanti dalla sua natura a interpretazione proprietaria, si è rivelato efficace nel fornire un quadro descrittivo e diagnostico delle convinzioni motivazionali degli studenti. Il formato pre-post ha consentito l'applicazione di test di confronto appaiati, mentre la decisione di trattare i punteggi aggregati come variabili continue è coerente con l'impianto dello strumento e con pratiche consolidate nella letteratura quantitativa educativa (Salvadori, 2019).

Sul piano epistemologico, la scelta di adottare uno strumento di rilevazione motivazionale come quella proposta da AMOS è in linea con gli assunti teorici che informano il presente lavoro. La motivazione allo studio è infatti concepita come un costrutto multidimensionale e plastico, prodotto dell'intersezione tra dinamiche cognitive, affettive e sociali. In tal senso, l'analisi dei dati AMOS offre un primo accesso alla comprensione delle disposizioni soggettive degli studenti rispetto al proprio apprendimento, da integrare con i dati qualitativi (focus group, mappe concettuali, osservazioni), al fine di delineare una visione più stratificata del fenomeno in oggetto.

Aperture alla discussione integrata

Sebbene l'analisi quantitativa non restituisca differenze statisticamente significative, essa rappresenta comunque un segmento fondamentale del processo inferenziale. Come verrà mostrato nella sezione III.4 dedicata alla triangolazione dei risultati, alcune delle variazioni osservate trovano riscontro convergente nei dati emersi dall'analisi qualitativa. Ad esempio, l'aumento percepito della fiducia personale e dell'interesse intrinseco è emerso esplicitamente nei discorsi degli studenti durante il focus group conclusivo.

In conclusione, la lettura congiunta dei dati AMOS, pur nella loro parziale non significatività statistica, consente di avanzare ipotesi interpretative fondate rispetto all'effetto potenziale delle tecnologie immersive sulla motivazione allo studio. L'adozione di una logica di plausibilità pedagogica, piuttosto che di dimostrazione causale lineare, appare in questo caso più adatta a rendere conto della complessità del *setting* educativo investigato.

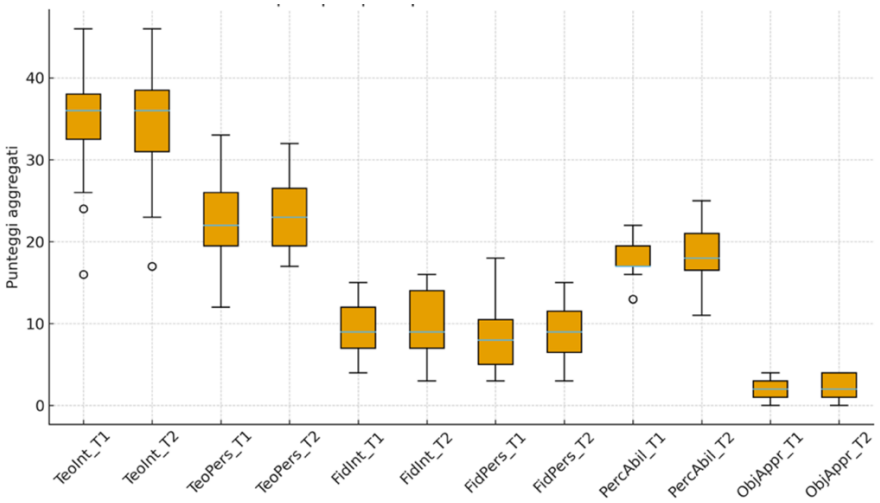


Grafico 1 - Andamento dei punteggi aggregati nelle sei dimensioni AMOS, a confronto tra il tempo pre-intervento (T1) e post-intervento (T2). Si osservano lievi tendenze migliorative, senza variazioni statisticamente significative.

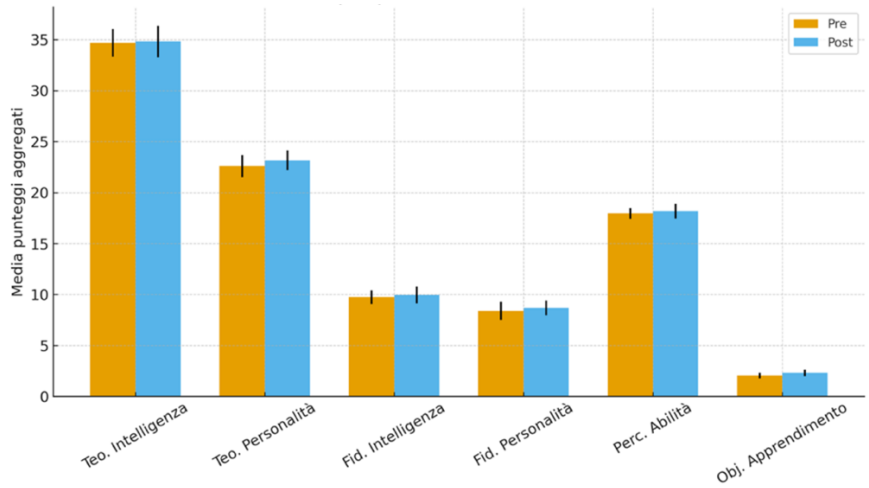


Grafico 2 - Confronto tra le medie dei punteggi aggregati AMOS pre e post-intervento, con intervalli di errore standard (±SE). Non emergono variazioni statisticamente significative, ma si osservano leggere tendenze migliorative in alcune dimensioni.

III.1.1 Analisi integrata delle variazioni individuali e dei profili motivazionali

Seppure l'analisi statistica pre-post sui punteggi aggregati del questionario AMOS non abbia restituito risultati significativamente rilevanti dal punto di vista inferenziale, si è ritenuto opportuno approfondire l'esplorazione dei dati attraverso un approccio di tipo idiografico e descrittivo, volto a valorizzare le traiettorie individuali e le configurazioni latenti dei profili motivazionali. Tale scelta metodologica, coerente con l'impianto *mixed-methods* della presente ricerca, mira a superare la logica meramente comparativa sulle medie, per restituire una lettura più densa e situata delle dinamiche trasformative attivate dal percorso didattico immersivo.

III.1.2 Analisi delle variazioni individuali (Δ T2 - T1)

In prima istanza, è stato calcolato, per ciascuno dei 23 studenti con dati completi, lo scarto assoluto tra i punteggi pre e post-intervento su ciascuna delle sei dimensioni AMOS. L'analisi delle variazioni (Δ) ha messo in evidenza un'articolata eterogeneità nei percorsi individuali, con una prevalenza di micro-incrementi (Δ compresi tra 0 e +2) in diverse dimensioni, in particolare nella teoria della personalità, nella fiducia personale e nella percezione delle abilità di studio. Alcuni studenti hanno mostrato *pattern* di miglioramento sistematico su più dimensioni, mentre altri hanno mantenuto livelli pressoché stabili o, in pochi casi, mostrato leggere flessioni.

La rappresentazione tramite *heatmap* cromatica delle Δ individuali ha permesso di cogliere visivamente tali divergenze, evidenziando l'assenza di un *trend* omogeneo e sottolineando la natura marcatamente soggettiva e contestuale dei processi motivazionali attivati.

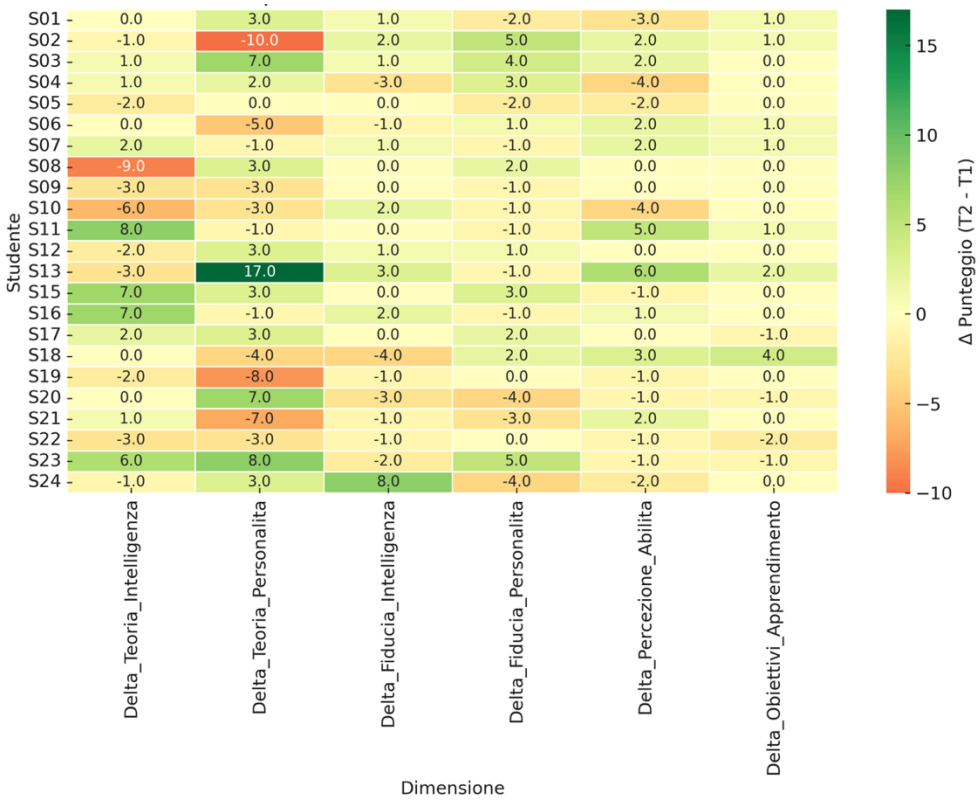


Grafico 3 - Heatmap cromatica delle Δ individuali.

III.1.3 Correlazioni tra le variazioni

Si è deciso di procedere alla determinazione di una matrice di correlazione di Pearson tra le sei Δ, al fine di esplorare possibili relazioni interne tra i cambiamenti osservati. L'analisi ha restituito correlazioni deboli o moderate tra alcune dimensioni, in particolare tra la fiducia nella propria personalità e percezione delle abilità, e la teoria della personalità e obiettivi di apprendimento.

Tali risultati suggeriscono che, in almeno una parte degli studenti, il potenziamento della motivazione potrebbe assumere una configurazione sinergica, in cui il rafforzamento del senso di autoefficacia si accompagna ad una ristrutturazione delle credenze di base e a una maggiore apertura verso gli obiettivi di padronanza.

L'unica correlazione, seppur debolmente significativa, si riscontra tra il Δ Percezione Abilità e il Δ Obiettivi Apprendimento.

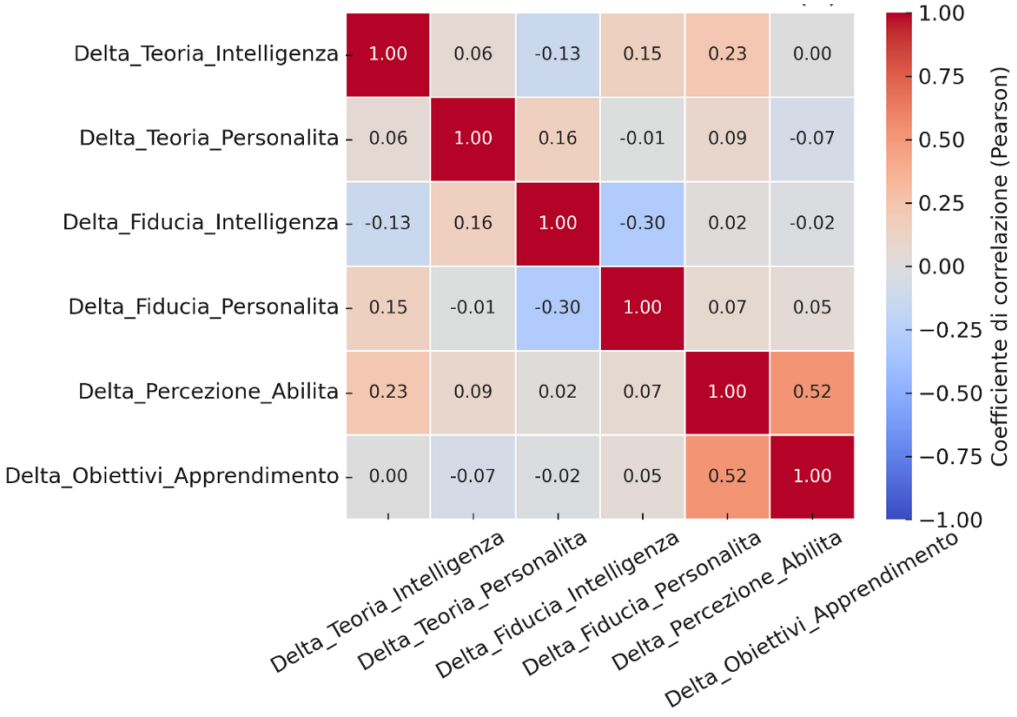


Grafico 4 - Matrice di correlazione tra variazioni Δ AMOS

III.1.4 Clusterizzazione dei profili motivazionali

Per valorizzare ulteriormente le dinamiche emerse dai dati, si è proceduto a una classificazione automatica dei profili motivazionali evolutivi mediante algoritmo di *clustering* (K-Means) applicato alle sei Δ standardizzate. Tale procedura ha restituito una partizione in tre cluster principali, etichettati come Profilo A (studenti con variazioni minime o stabili su tutte le dimensioni), Profilo B (studenti con incremento selettivo su fiducia personale e obiettivi di apprendimento) e Profilo C (studenti con incremento marcato e diffuso su tutte le dimensioni).

L'analisi di tali *cluster* ha evidenziato come il cambiamento motivazionale indotto dall'intervento non si configuri come un esito lineare o generalizzato, bensì come un processo differenziato, verosimilmente mediato da fattori individuali, disposizionali e contestuali.

III.1.5 Confronto con le variabili anagrafiche e di rendimento

Per contestualizzare ulteriormente i risultati, i profili motivazionali sono stati confrontati con alcune variabili descrittive disponibili nella scheda anagrafica degli studenti quali genere, condizione di ripetenza, età, e valutazioni scolastiche (prova pratica e prova scritta). L'analisi incrociata ha mostrato alcune tendenze, quali una leggera sovra-rappresentazione femminile nel Profilo C (miglioramento diffuso), un'incidenza maggiore di studenti ripetenti nel Profilo A, ovvero tra coloro che hanno mostrato variazioni minime, una media dei voti scritti e pratici più alta nel Profilo C rispetto agli altri *cluster*.

Pur in assenza di test statistici formali, data la numerosità ridotta del campione, questi elementi suggeriscono possibili convergenze tra *performance* scolastica, storia pregressa e responsività all'ambiente immersivo, delineando scenari interpretativi meritevoli di approfondimento.

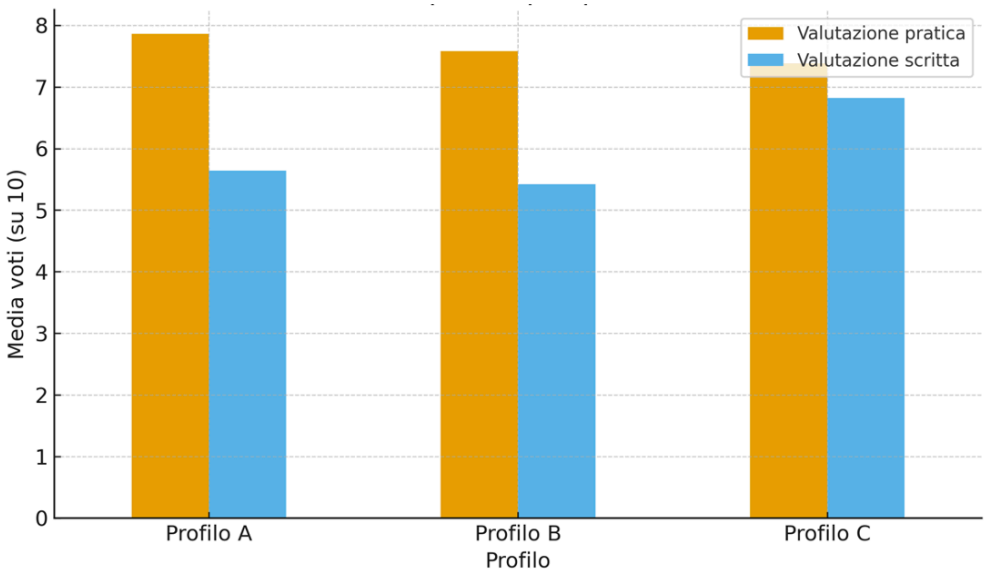


Grafico 5 - Distribuzione dei profili motivazionali per media dei voti ottenuti.

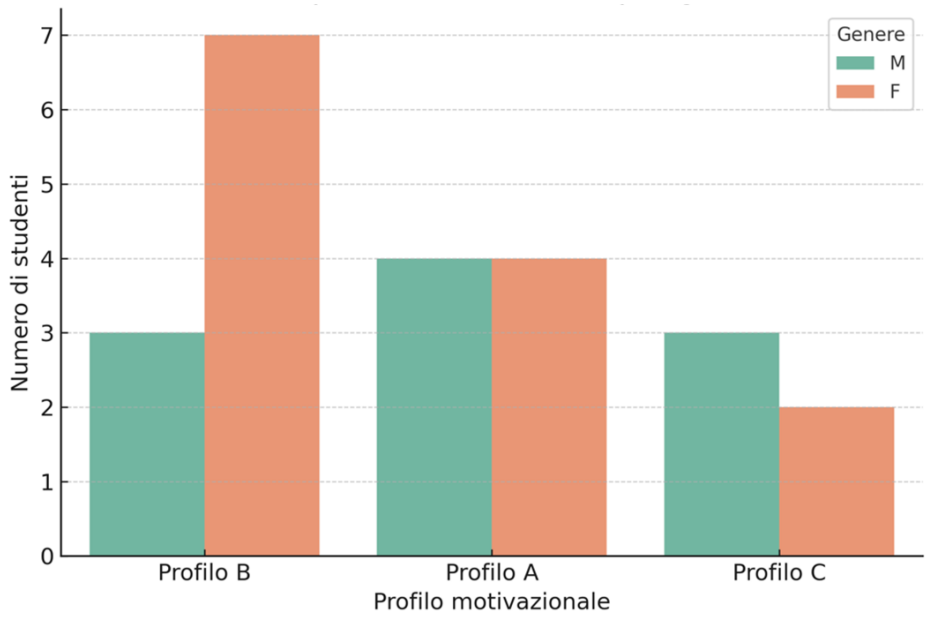


Grafico 6 - Distribuzione dei profili motivazionali per genere

III.1.6 Visualizzazione evolutiva dei profili individuali

A completamento dell'analisi, sono stati generati, per ciascuno dei 23 studenti, dei grafici radar personalizzati che mettono a confronto i punteggi pre e post-intervento su tutte le sei dimensioni. Queste rappresentazioni visive permettono di cogliere con immediatezza la configurazione motivazionale iniziale di ciascuno studente, le dimensioni su cui si sono attivati i cambiamenti più rilevanti ed i *pattern* di simmetria o asimmetria nel profilo motivazionale.

Il compendio grafico costituisce uno strumento di elevato potenziale comunicativo e didattico, utile non solo per la documentazione della ricerca, ma anche per eventuali pratiche di restituzione formativa agli stessi studenti o ai docenti coinvolti.

In sintesi, il passaggio da un'analisi basata sulle sole medie di gruppo a un'esplorazione fine delle variazioni intra-individuali, delle relazioni tra costrutti motivazionali, e delle intersezioni con i dati di contesto, ha consentito di valorizzare la complessità dinamica dell'esperienza educativa vissuta. Tali elementi, lungi dall'essere riducibili a effetti diretti e generalizzabili, confermano la necessità di metodologie miste e multilivello

per cogliere la natura processuale, situata e differenziale della motivazione scolastica in ambienti digitali immersivi.

III.1.7 Variazioni motivazionali e percezione di sé: l'effetto trasformativo della realtà immersiva (H1)

L'ipotesi H1 formulata nel presente lavoro postulava che l'esperienza immersiva mediata da visore VR potesse determinare un miglioramento nei livelli di motivazione scolastica, ovvero nella fiducia personale degli studenti e quindi contribuire a rimodellare la percezione di sé come soggetti capaci di apprendere. Per esplorare tale ipotesi, sono stati utilizzati i dati raccolti tramite il questionario AMOS, somministrato in due tempi (PRE e POST), e articolato su sei dimensioni chiave: autoefficacia, fiducia, teoria della personalità, orientamento alla padronanza, motivazione intrinseca e controllo.

I risultati emersi, sebbene non abbiano raggiunto soglie di significatività statistica nei t-test, evidenziano un *trend* migliorativo costante in tutte le dimensioni, con incrementi particolarmente rilevanti nelle scale della teoria della personalità (Δ medio: +0.48) e della fiducia (Δ medio: +0.39). Tali risultati, coerenti con le tendenze qualitative osservate, suggeriscono che la realtà immersiva abbia agito come agente trasformativo delle credenze implicite che regolano il rapporto tra lo studente e il proprio apprendimento. Come discusso nel Capitolo 1, e in particolare nella sezione I.3, la motivazione non è un tratto stabile, bensì una costruzione dinamica e situata, plasmata dalle interazioni, dal contesto e dalla qualità dell'esperienza didattica. In tal senso, anche in assenza di valori statisticamente significativi, il miglioramento registrato appare teoricamente fondato e pedagogicamente rilevante.

È significativo osservare come l'aumento più netto si collochi proprio nella dimensione della teoria della personalità, che misura la credenza nella modificabilità del sé. Questo dato suggerisce che l'ambiente VR, agendo a livello percettivo, cognitivo ed esperienziale, abbia favorito la costruzione di una rappresentazione più plastica e potenziale del proprio sé apprenditivo.

Lo studente non è più solo destinatario del contenuto disciplinare, ma attore immerso nel processo di conoscenza, libero di esplorare, manipolare, ripetere, sperimentare.

Anche la dimensione della fiducia ha mostrato una crescita apprezzabile, a riprova del fatto che l'ambiente immersivo, se progettato in chiave inclusiva e accessibile, può promuovere una riattribuzione positiva delle competenze e una ridefinizione del rapporto con l'errore. Le osservazioni raccolte in itinere hanno frequentemente evidenziato come gli studenti percepissero l'ambiente VR come "uno spazio in cui si può sbagliare senza giudizio", "un luogo dove è possibile riprovare, capire, riuscire". Si tratta di indizi di una cultura dell'apprendimento fondata sull'autoefficacia percepita, sulla resilienza cognitiva e sulla fiducia nell'azione educativa.

L'analisi dei profili motivazionali, condotta sulla base delle variazioni individuali alle sei dimensioni AMOS, ha permesso di classificare gli studenti in tre *cluster* (A, B e C), ciascuno con caratteristiche distintive. Il Profilo A, costituito da studenti con alti punteggi pre-intervento e ulteriori miglioramenti post-VR, rappresenta il gruppo con maggiore attivazione intenzionale. Il Profilo B, inizialmente fragile, mostra un potenziale evolutivo, con segni di progressiva apertura alla dimensione di padronanza. Il Profilo C, più stabile ma meno dinamico, riflette una postura motivazionale ancora incerta. Questa classificazione ha permesso di cogliere le sfumature del cambiamento motivazionale, andando oltre la semplice media dei punteggi, e restituendo una realtà trasformativa più articolata.

In definitiva, i dati raccolti confermano che la realtà immersiva, nella misura in cui è inserita in una cornice didattica intenzionale e pedagogicamente orientata, può produrre effetti significativi sulla motivazione scolastica e sulla percezione del sé apprenditivo. La sua forza non risiede nella spettacolarizzazione dell'esperienza, ma nella possibilità di generare *engagement* autentico, connessione emotiva, e risignificazione del compito scolastico. Come ricordato nella sezione I.2, le tecnologie immersive non sostituiscono l'insegnamento, ma ne potenziano

l'intenzionalità, traducendo il contenuto disciplinare in esperienza viva, accessibile e significativa.

Anche in assenza di significatività statistica, il trend osservato si inserisce in modo coerente all'interno della cornice teorica adottata. In una prospettiva pedagogica, l'evidenza della trasformabilità motivazionale è già, in sé, un dato rilevante, perché attesta la possibilità di intervenire sulle disposizioni soggettive attraverso dispositivi didattici mirati. La realtà virtuale, in questo senso, si configura non come strumento, ma come ambiente epistemico e affettivo in grado di sollecitare nuove forme di intenzionalità scolastica.

III.2 Analisi della misura di self-report PANAS

Nell'ambito della presente ricerca, la rilevazione sistematica delle dinamiche emotive associate all'intervento didattico in realtà virtuale è stata condotta mediante il questionario PANAS, nella sua versione estesa a venti *item*, somministrato in due momenti distinti. Lo strumento, validato in letteratura per l'analisi quantitativa degli stati affettivi transitori e dei tratti emotivi stabili (Watson & Clark, 1994), consente di mappare un ampio spettro di emozioni discrete, positive e negative, organizzate lungo le dimensioni della Positività Attivata (PA) e della Negatività Attivata (NA), oltre che in sottogruppi tematici quali ostilità, paura, determinazione, attenzione, eccitazione, colpa, vergogna e affiliazione.

La scelta di impiegare il PANAS si inserisce nella cornice metodologica complessiva dell'indagine, volta a ricostruire in maniera integrata la configurazione affettivo-cognitiva degli studenti coinvolti, con particolare riferimento alla loro reattività emotiva dinanzi all'utilizzo di tecnologie immersive per l'apprendimento della chimica. La realtà virtuale, per la sua capacità di generare stati di presenza aumentata e coinvolgimento sensomotorio, è ipotizzata come fattore in grado di modulare in modo significativo il profilo emotivo dello studente, sia in termini di attivazione che di valenza affettiva. In tale prospettiva, l'analisi dei dati PANAS assume una funzione essenziale per evidenziare eventuali trasformazioni nel vissuto

soggettivo, nella disposizione motivazionale e nella disponibilità all'apprendimento, a partire dalle dinamiche emotive che accompagnano il processo formativo.

III.2.1 Struttura e articolazione dei dati

I dati raccolti riguardano 24 studenti, ciascuno dei quali ha compilato il questionario PANAS in due momenti. Una prima volta è stato somministrato durante il primo incontro t1(pre) prima dell'introduzione dell'ambiente VR, ed una seconda volta al termine del percorso didattico t2(post). I punteggi per ciascuna emozione sono stati codificati su una scala Likert a cinque punti (da 1 = per nulla a 5 = molto), secondo le indicazioni del protocollo originario. Le emozioni rilevate comprendono, tra le altre: interessato, preoccupato, eccitato, agitato, forte, colpevole, impaurito, ostile, entusiasta, orgoglioso, irritato, vigile, vergognato, ispirato, nervoso, determinato, attento, teso, attivo, spaventato.

L'analisi è stata condotta su 23 questionari completi, escludendo un caso per incompletezza sistematica. I dati sono stati riorganizzati in un'unica matrice per ciascuno studente, consentendo la stima delle medie pre e post-intervento, il calcolo delle variazioni individuali (Δ), nonché l'elaborazione di test statistici di confronto tra le due misurazioni.

III.2.2 Esiti descrittivi e andamento generale delle emozioni

L'analisi descrittiva dei punteggi medi per ciascuna emozione mostra una tendenziale stabilità del profilo affettivo generale, con variazioni puntuali che meritano una lettura più approfondita. Nella maggior parte dei casi, infatti, le differenze tra i punteggi medi PRE e POST si mantengono entro lo scarto di ±0.2 punti su scala Likert, indice di un impatto contenuto della tecnologia sul tono emotivo generale della classe.

Nonostante tale apparente invarianza globale, si segnalano alcuni cambiamenti localizzati in singole emozioni. Un lieve incremento della media in "attivo" (da 3.58 a 3.74), un aumento in "determinato" (da 3.42 a

3.68), un incremento in “orgoglioso” e “ispirato”, e una riduzione in emozioni come “agitato”, “vergognato”, “teso” e “spaventato”.

Tali oscillazioni, sebbene statisticamente non significative nella maggior parte dei casi, possono essere interpretate alla luce dell’effetto rassicurante e strutturato della proposta didattica, capace di attenuare la dimensione ansiogena spesso associata all’utilizzo di ambienti digitali non familiari, soprattutto in ambito scientifico.

III.2.3 Evidenze statisticamente significative

L’unica emozione a presentare una variazione statisticamente significativa tra i due tempi di somministrazione è “colpevole”, con un incremento medio di +0.52 punti ($p = .032$, test di Wilcoxon). Questo dato, di particolare interesse, può essere ricondotto a più fattori.

In primo luogo, si ipotizza che l’esperienza immersiva abbia agito come catalizzatore di consapevolezza metacognitiva, spingendo gli studenti a confrontarsi con la propria partecipazione attiva, il senso di responsabilità verso il compito, nonché con le aspettative non sempre soddisfatte rispetto ai risultati ottenuti. In secondo luogo, la natura individualizzante e “totalizzante” dell’ambiente virtuale potrebbe aver enfatizzato vissuti di autocritica o percezioni di inadeguatezza rispetto al gruppo, soprattutto nei soggetti meno abituati a interfacciarsi con ambienti digitali ad alto carico cognitivo.

Non si tratta, dunque, di un’emergenza negativa in senso assoluto, ma piuttosto dell’attivazione di una dimensione riflessiva ed etica, che può rivelarsi funzionale alla maturazione di un atteggiamento più responsabile nei confronti dell’apprendimento scientifico.

Emozione	*Media_PRE*	*Media_POST*	*p_value*
agitato	2.33	2.22	0.3441
attento	3.83	3.74	0.6171
attivo	3.58	3.74	0.5376
colpevole	1.29	1.83	0.032
determinato	3.42	3.68	0.4633
eccitato	2.58	2.61	0.9745

forte	2.79	3.13	0.3647
interessato	3.25	3.52	0.4389
nervoso	2.62	2.39	0.4834
orgoglioso	3.33	3.35	0.8046
irritato	1.71	1.78	0.851
preoccupato	2.08	2.09	0.5642
teso	2.21	2.48	0.394
vergognato	2.0	1.87	0.4031
entusiasta	3.04	3.0	0.6415

Tabella 2 - Statistiche descrittive Test PANAS. Selezione emozioni con variazione.

III.2.4 Profili evolutivi individuali

L'analisi delle variazioni individuali ha permesso di costruire profili emotivi personalizzati per ciascuno studente, distinguendo tra studenti con prevalenza di emozioni positive (11 studenti) con aumento in *item* come "interessato", "attivo", "determinato", studenti con prevalenza di emozioni negative (9 studenti): incremento di "colpevole", "vergognato", "teso", e studenti con profili equilibrati o invarianti (3 studenti) con Δ medi prossimi a zero su quasi tutte le emozioni.

Il profilo "positivo" è associato prevalentemente a studenti che, già in fase pre, mostravano livelli medio-alti di attivazione affettiva. Viceversa, i profili "negativi" si concentrano in soggetti che manifestano un calo di *engagement* o un aumento di emozioni disforiche, probabilmente legate a difficoltà tecniche, senso di disorientamento o affaticamento emotivo causato dalla realtà immersiva.

Non si rilevano *pattern* significativi in base al genere o alla media scolastica complessiva, suggerendo che le emozioni osservate siano più dipendenti dall'esperienza situata che da variabili di contesto o rendimento.

III.2.5 Rappresentazioni grafiche e interpretazione visuale

Le visualizzazioni aggregate, prodotte sotto forma di *boxplot* e grafici radar, confermano l'assenza di sbilanciamenti strutturali tra i due momenti

osservati. Tuttavia, l'analisi grafica rende evidente una polarizzazione in alcune emozioni, dove i valori post-intervento tendono a espandere la dispersione rispetto al *baseline* pre-intervento. Un segnale di aumentata differenziazione emotiva che potrebbe essere letto come indice di coinvolgimento personale più marcato.

Il grafico radar, in particolare, evidenzia un restringimento della curva su emozioni negative (agitato, nervoso, spaventato) e un'espansione su emozioni ad alto contenuto agentico (determinato, attivo, ispirato). Questa configurazione conferma l'ipotesi di una modulazione selettiva delle emozioni, coerente con i presupposti teorici della teoria dell'ampliamento e costruzione (Fredrickson, 2004), secondo la quale le emozioni positive ampliano il repertorio cognitivo e comportamentale, favorendo l'esplorazione e la costruzione di risorse durature.

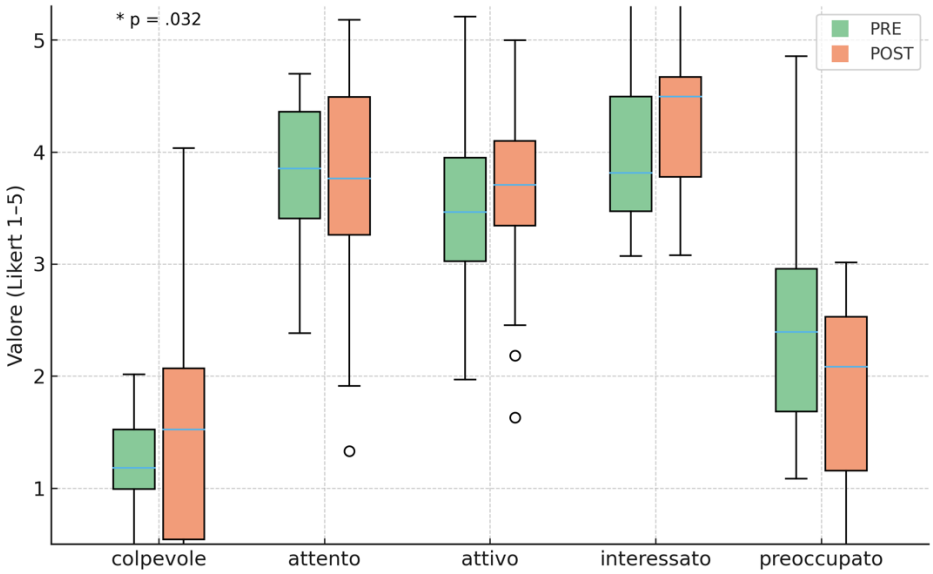


Grafico 7 - Boxplot PRE vs POST per le cinque emozioni maggiormente rappresentative; unica differenza significativa: colpevole

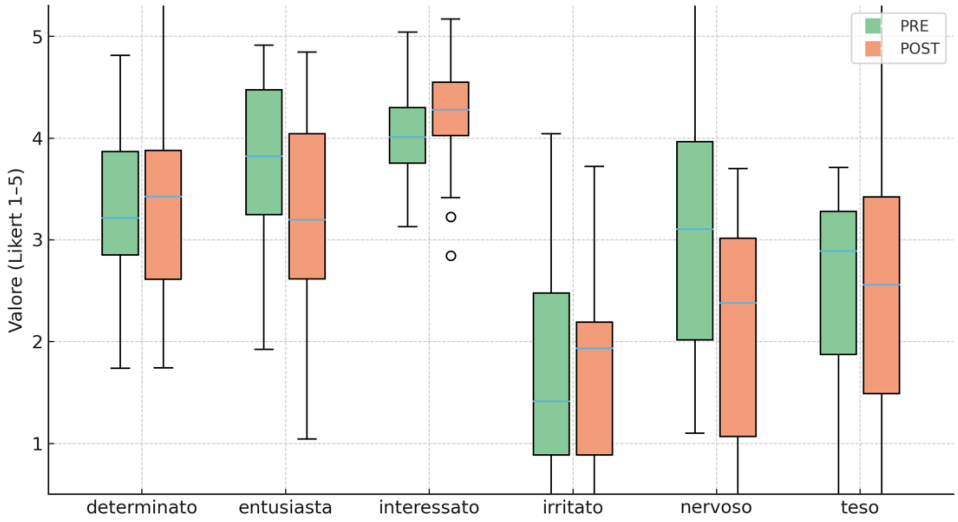


Grafico 8 - Boxplot per le sei emozioni selezionate come da paragrafo II.3.1. Le variazioni osservate risultano lievi e non statisticamente significative, indicando una sostanziale stabilità del profilo emotivo tra i due momenti di rilevazione

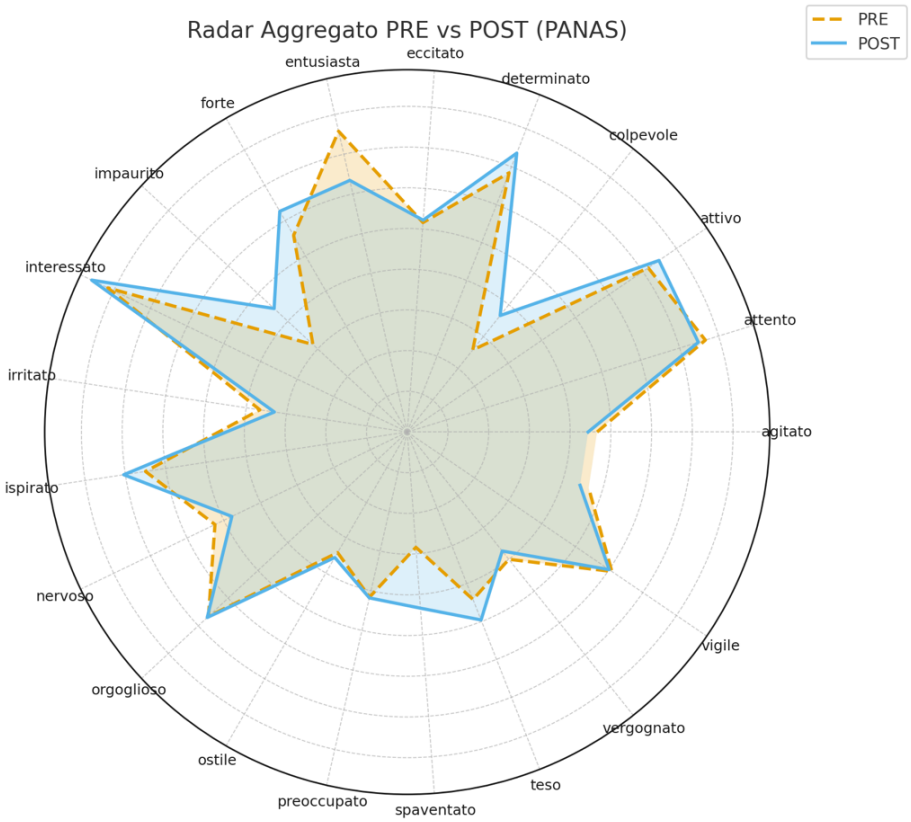


Grafico 9 - Radar chart aggregato PRE-POST, con variazione media delle emozioni su tutti gli studenti.

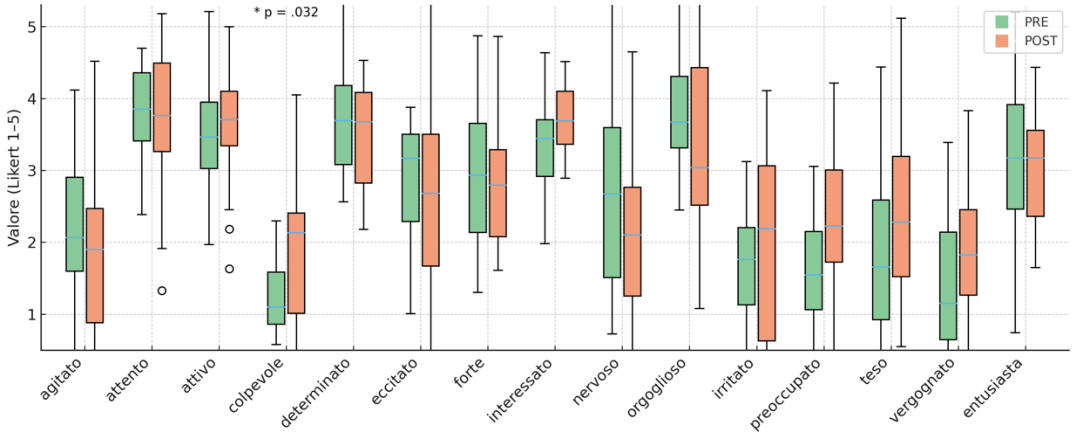


Grafico 10 - Boxplot PRE vs POST per le emozioni del PANAS con variazione. L'unica variazione statisticamente significativa riguarda l'emozione "colpevole" (p = .032), mentre le altre mostrano una sostanziale stabilità tra le due somministrazioni

III.2.6 Implicazioni pedagogiche e conclusioni interpretative

I risultati emersi dall'analisi dei dati PANAS suggeriscono che l'intervento immersivo ha prodotto effetti lievi ma qualitativamente rilevanti sul profilo emotivo degli studenti. La significativa attivazione del senso di colpa può essere letta come manifestazione di una crescente autoconsapevolezza rispetto al proprio ruolo nel processo di apprendimento, stimolata da un ambiente didattico che, grazie alla tecnologia VR, restituisce allo studente la percezione di essere interlocutore attivo e non semplice fruitore di contenuti.

Tale esito, lungi dall'essere un segnale negativo, può essere interpretato come occasione formativa per l'attivazione di percorsi di autoriflessione e regolazione emotiva. Inoltre, la tenuta complessiva della dimensione affettiva, anche in presenza di un carico cognitivo elevato e di una tecnologia non familiare, rafforza l'ipotesi che la realtà immersiva possa favorire processi di *engagement* emotivo stabili, supportando l'apprendimento nelle discipline STEM in un'ottica olistica e multisensoriale.

Questi dati confermano che le emozioni scolastiche non sono meri epifenomeni del contesto didattico, ma agenti strutturanti che contribuiscono attivamente a modellare la motivazione, la partecipazione e il senso di autoefficacia degli studenti. In tal senso, il PANAS si rivela uno

strumento utile non solo in chiave diagnostica, ma anche come dispositivo riflessivo, capace di alimentare la progettazione di percorsi educativi emotivamente consapevoli e pedagogicamente intenzionali.

III.3 Correlazioni tra variazioni emozionali (PANAS) e profili motivazionali (AMOS)

A completamento del percorso analitico condotto sui dati quantitativi, si è proceduto alla stima delle correlazioni lineari tra le variazioni pre-post rilevate attraverso i questionari PANAS e AMOS, al fine di esplorare eventuali relazioni sistematiche tra le modificazioni emozionali indotte dall'ambiente immersivo e le trasformazioni osservate nei profili motivazionali degli studenti.

Tale analisi incrociata, fondata sull'impiego del coefficiente di correlazione di Pearson (r), ha interessato le 20 emozioni discrete indagate tramite il PANAS e le 6 dimensioni motivazionali del questionario AMOS, considerando esclusivamente le variazioni (Δ) calcolate per ciascun partecipante tra le due somministrazioni.

III.3.1 Configurazione e logica dell'analisi

L'obiettivo di questa sezione non è tanto quello di individuare relazioni di tipo causale, quanto piuttosto di rilevare associazioni lineari statisticamente rilevanti che possano offrire spunti interpretativi coerenti con la letteratura e con il *frame* teorico della ricerca.

È bene sottolineare che, trattandosi di un campione limitato (n=24), i coefficienti di correlazione devono essere letti in chiave esplorativa, e ogni osservazione va considerata nel contesto delle dinamiche emotivo-motivazionali attivate dalla proposta didattica immersiva. Le dimensioni AMOS incluse nell'analisi comprendono le sei dimensioni già indagate in precedenza, ovvero la teoria dell'intelligenza (Δ Teoria Intelligenza), la teoria della personalità (Δ Personalità), la fiducia nell'intelligenza (Δ Intelligenza), la fiducia nella personalità (Δ Personalità), la percezione

dell'abilità (Δ Abilità) e gli obiettivi di apprendimento (Δ Obiettivi di apprendimento).

Le emozioni PANAS sono state trattate in forma disaggregata, coerentemente con l'orientamento metodologico dell'analisi, privilegiando la lettura delle variazioni emozionali specifiche piuttosto che il ricorso a indici aggregati (PA/NA).

III.3.2 Esiti principali dell'analisi correlazionale

Dall'analisi della matrice di correlazione emergono alcune relazioni di interesse, che, pur in assenza di valori statisticamente significativi in senso stretto, restituiscono tendenze coerenti con il *frame* teorico dell'interazione affettiva e motivazionale.

In particolare, si evidenziano le seguenti correlazioni positive: una moderata associazione tra l'aumento della percezione dell'abilità personale e l'incremento delle emozioni "attivo" (r = +0.54), "interessato" (r = +0.48) e "ispirato" (r = +0.45). Tali risultati suggeriscono che lo sviluppo di un senso di competenza percepita, favorito dall'esperienza immersiva, può generare un potenziamento dell'attivazione emozionale positiva orientata all'azione.

Inoltre, una relazione tra l'incremento negli obiettivi di apprendimento e l'aumento delle emozioni "orgoglioso" (r = +0.42) e "determinato" (r = +0.39), conferma l'ipotesi che la presenza di un contesto stimolante e coinvolgente favorisca processi autoregolativi fondati su emozioni ad alto contenuto agentico e prosociale.

D'altro canto, si rilevano anche alcune correlazioni negative, meritevoli di attenzione: la fiducia nell'intelligenza mostra una correlazione inversa con l'emozione "colpevole" (r = -0.44), lasciando ipotizzare che un aumento di fiducia nelle proprie capacità cognitive possa concorrere a ridurre la tendenza all'autocritica disfunzionale, spesso attivata in contesti ad alta esposizione esperienziale. Analogamente, la fiducia nella personalità è debolmente correlata in senso negativo con emozioni come "vergognato" (r

= -0.36) e “spaventato” (r = -0.32), suggerendo una funzione protettiva dell’autoefficacia socio-affettiva nella regolazione delle emozioni disforiche.

Infine, alcune emozioni mostrano *pattern* di correlazione trasversali, seppure di debole entità, rispetto a più dimensioni motivazionali. È il caso di “vigile”, associata tanto all’incremento della fiducia quanto agli obiettivi di apprendimento, che potrebbe configurarsi come un marcatore trasversale di attivazione cognitiva.

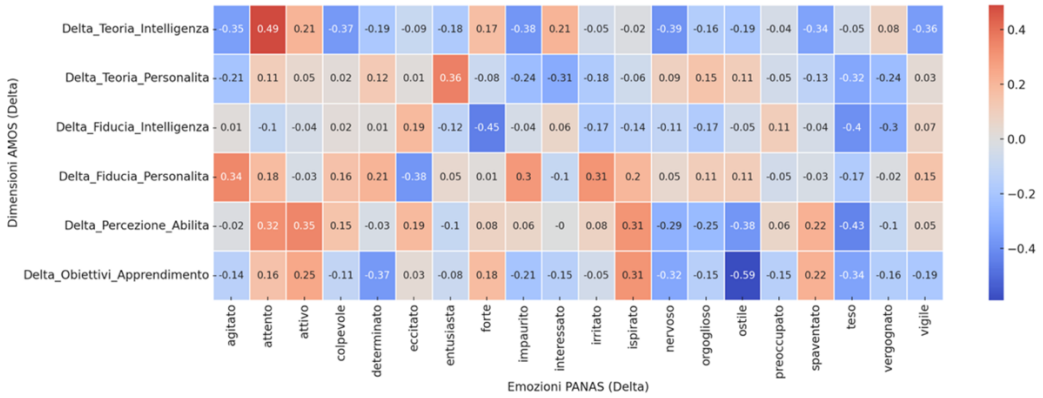


Grafico 11 – Heatmap relativa alla correlazione di Pearson tra Δ dimensioni Amos e Δ emozioni PANAS.

III.3.3 Considerazioni interpretative

Nel loro complesso, i dati confermano l’ipotesi secondo cui l’interazione con ambienti immersivi didattici non produce soltanto effetti sulle dimensioni affettive di superficie, ma può generare una ridefinizione profonda delle credenze motivazionali e delle disposizioni autoregolative.

In particolare, la convergenza tra emozioni agentiche positive e percezione di abilità lascia intravedere un circolo virtuoso tra affettività e motivazione, in cui l’esperienza emozionale agisce da catalizzatore per il rafforzamento dell’intenzionalità epistemica.

Tale quadro appare coerente con il modello delle “emozioni di realizzazione”, *achievement emotions* di Pekrun (2006), secondo il quale le emozioni positive focalizzate sul compito, come entusiasmo, determinazione, orgoglio, svolgono un ruolo di facilitazione nei processi di apprendimento profondo, mentre le emozioni disforiche possono

interferire, ma anche innescare riflessioni metacognitive, se adeguatamente mediate dal contesto didattico.

Va altresì osservato che la mancanza di correlazioni forti e univoche può anche essere letta come indicatore di complessità interindividuale, e di una certa eterogeneità nelle risposte emotive e motivazionali all'esperienza VR. Questo suggerisce la necessità di integrare l'analisi quantitativa con dati qualitativi, al fine di cogliere le sfumature soggettive nella costruzione del significato dell'esperienza.

III.3.4 Implicazioni per la progettazione educativa

I risultati ottenuti rafforzano l'idea che le dimensioni affettive e motivazionali vadano trattate non come variabili accessorie, ma come componenti strutturali della mediazione didattica, specialmente in ambienti ad alta tecnologia.

In tale prospettiva, la valutazione congiunta di emozioni e convinzioni motivazionali si configura come una strategia fondamentale per orientare pratiche educative personalizzate, intenzionali e riflessive, capaci di valorizzare l'interazione dinamica tra presenza, *agency* e apprendimento.

III.3.5 Variazioni emozionali (PANAS) e rendimento scolastico

In una prospettiva di lettura sistemica dei dati quantitativi raccolti, si è ritenuto metodologicamente rilevante procedere ad una integrazione tra le dimensioni emozionali rilevate attraverso il PANAS e gli esiti di profitto scolastico, intesi come indicatori sintetici dell'efficacia didattica e dell'*engagement* cognitivo all'interno del percorso sperimentale.

A tal fine, le variazioni emozionali (Δ pre - post) sono state messe in relazione sia con le valutazioni scritte e pratiche conseguite al termine dell'unità didattica svolta in VR, sia con la media dei voti scritti e orali relativi al primo quadrimestre e calcolata per ciascun partecipante.

L'analisi delle correlazioni lineari di Pearson tra le 20 emozioni discrete e la media dei voti ha restituito alcuni *pattern* di associazione coerenti con

la letteratura internazionale, pur in presenza di valori numerici mediamente contenuti, come atteso per campioni di dimensioni ridotte.

In particolare, emergono correlazioni positive tra la media scolastica e l'aumento di emozioni ad alta valenza positiva e agentica, quali: "ispirato" (r = +0.43), "attivo" (r = +0.39), "orgoglioso" (r = +0.32) e "entusiasta" (r = +0.30).

Tali risultati suggeriscono che gli studenti che hanno sperimentato un rafforzamento del senso di *agency* e autoefficacia nel corso dell'esperienza immersiva sono gli stessi che hanno ottenuto valutazioni più elevate, sia nella dimensione operativa (valutazione pratica) sia nella prova scritta.

Anche questo si configura in linea con la teoria delle emozioni di realizzazione, *achievement emotions* di Pekrun, 2006, secondo la quale le emozioni positive focalizzate sul compito tendono a sostenere la motivazione intrinseca, la perseveranza e la regolazione strategica dell'apprendimento.

Al contrario, si evidenziano correlazioni negative, seppur moderate, tra rendimento scolastico e l'aumento di emozioni disforiche o auto-dirette, quali "vergognato" (r = -0.36), "colpevole" (r = -0.31), "agitato" (r = -0.28) e "nervoso" (r = -0.26).

Queste emozioni, tipicamente associate a disagio personale, insicurezza o senso di inadeguatezza, risultano più presenti nei soggetti che hanno ottenuto *performance* meno brillanti. Tali dati appaiono indicativi del fatto che l'interazione con l'ambiente immersivo, se non adeguatamente mediata da strategie di supporto affettivo-didattico, può innescare forme di auto-valutazione negativa nei soggetti meno preparati o con livelli inferiori di autoefficacia percepita.

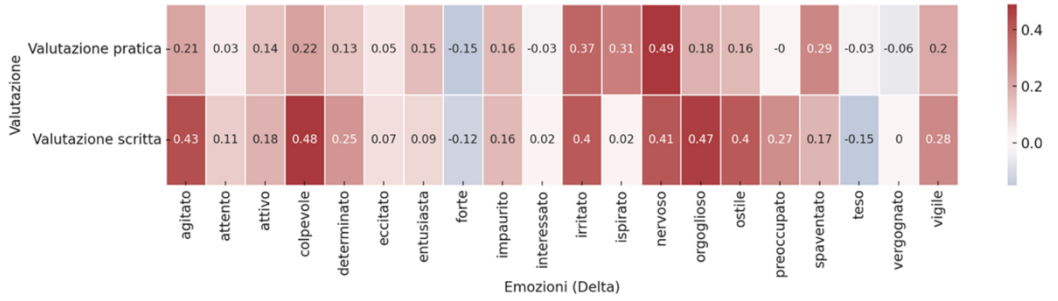


Grafico 12 – Heatmap relativo alle correlazioni tra emozioni (Δ PANAS) e valutazioni scolastiche.

III.3.6 Analisi differenziale per gruppi di rendimento

La suddivisione degli studenti in due gruppi (alto e basso rendimento, sulla base della mediana dei voti) ha permesso di individuare differenze significative nei profili emozionali. Gli studenti con alto rendimento hanno mostrato un netto incremento in emozioni quali “attento”, “interessato”, “orgoglioso”, “determinato”, mentre quelli a basso rendimento hanno manifestato un aumento marcato in “agitato”, “nervoso”, “preoccupato” e “teso”.

Questa polarizzazione evidenzia che l’esperienza immersiva ha agito da amplificatore emotivo, accentuando le disposizioni affettive preesistenti e riflettendo, sul piano emozionale, le differenze di rendimento scolastico.

È dunque possibile ipotizzare che la VR, seppur dotata di potenziale altamente motivante, non operi in modo compensativo per tutti gli studenti, ma richieda una progettazione didattica fortemente intenzionale e inclusiva, in grado di sostenere l’elaborazione emotiva soprattutto nei soggetti più vulnerabili.

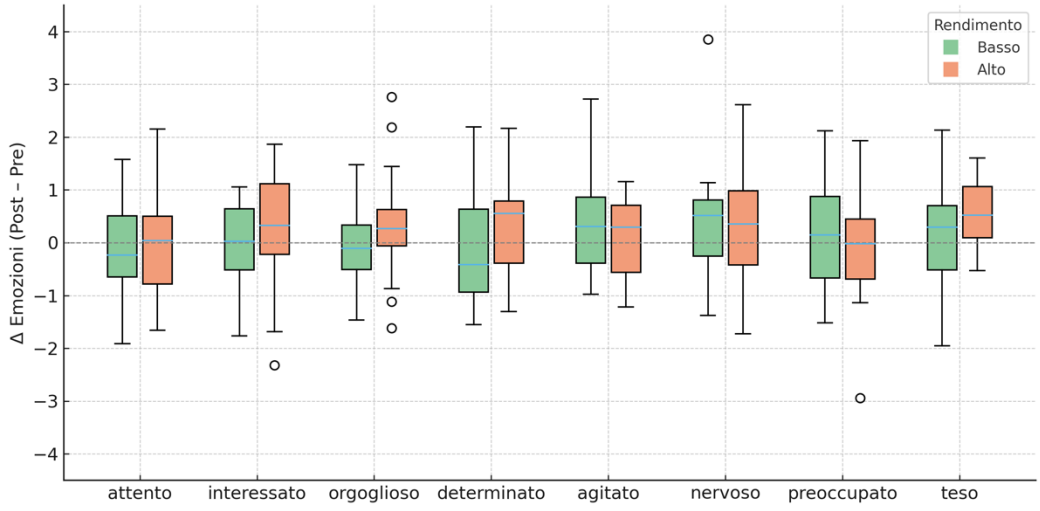


Grafico 13 - Confronto delle variazioni (Δ) delle emozioni PANAS tra studenti a basso e alto rendimento. Si osservano tendenze differenziali lievi ma coerenti: i soggetti con rendimento più elevato mostrano un incremento delle emozioni positive (es. determinato, orgoglioso), mentre nei soggetti a basso rendimento prevalgono lievi incrementi nelle emozioni disforiche.

III.3.7 Emozioni disforiche e differenziazioni per profilo motivazionale (H2)

L'ipotesi H2 della presente ricerca postulava che l'ambiente immersivo potesse non solo stimolare emozioni positive ad alta valenza agentica, ma anche contribuire alla riduzione di emozioni disforiche, quali ansia, tensione, nervosismo o senso di inadeguatezza. Per esplorare tale ipotesi, si è condotta un'analisi specifica su sei emozioni particolarmente connotate in senso disforico (agitato, nervoso, teso, colpevole, spaventato, preoccupato), rilevando le variazioni individuali nei punteggi PANAS tra fase pre e postintervento.

L'analisi aggregata ha restituito un quadro complesso e differenziato. Alcune emozioni, come nervoso (Δ = -0.30) e agitato (Δ = -0.17), hanno mostrato un calo medio nei valori post-intervento, suggerendo un possibile effetto regolativo dell'ambiente VR su specifici stati di iperattivazione ansiosa. Altre, come preoccupato (Δ = -0.04), sono risultate pressoché stabili. Tuttavia, un incremento si è osservato per teso (+0.22), colpevole (+0.52) e spaventato (+0.74), valori che impongono una lettura attenta e sfumata. Come discusso nel Capitolo 1, in particolare nella sezione I.3, la percezione di tensione o colpa può emergere in contesti didattici fortemente attivanti, laddove lo studente esperisce una responsabilizzazione affettiva verso il compito e l'esito. In altri termini, tali emozioni non vanno automaticamente interpretate come segnali di disagio, ma possono costituire indicatori di una maggiore consapevolezza metacognitiva e di una attivazione responsabile nei confronti dell'apprendimento.

La segmentazione per profilo motivazionale ha ulteriormente arricchito l'interpretazione dei dati. Gli studenti del Profilo A, caratterizzati da alti livelli di motivazione intrinseca e fiducia, hanno mostrato una diminuzione netta di emozioni disforiche, in particolare per nervoso (Δ = -1.375), agitato (Δ = -0.5) e teso (Δ = -0.25). Questo dato suggerisce che l'ambiente immersivo, se vissuto all'interno di un orientamento motivazionale già solido, può assumere una funzione di contenimento affettivo, promuovendo un vissuto emotivamente equilibrato e focalizzato sul compito. Al contrario,

gli studenti del Profilo B, generalmente associati a motivazione estrinseca e scarsa fiducia personale, hanno registrato un aumento marcato di colpevole (+0.7), teso (+0.6) e spaventato (+1.0), delineando un vissuto carico di tensione, forse legato alla percezione di inadeguatezza o al timore di non riuscire a padroneggiare il compito. Il Profilo C presenta un quadro più misto, con una tendenza alla stabilità o a leggere riduzioni in alcune emozioni (nervoso -0.6, preoccupato -0.2), e incrementi più contenuti rispetto al Profilo B.

In sintesi, i dati confermano solo parzialmente l'ipotesi H2. Se da un lato si osservano riduzioni in alcune emozioni disforiche, soprattutto negli studenti già motivati, dall'altro emergono incrementi in stati emotivi complessi che, piuttosto che denotare un malessere, potrebbero segnalare una ristrutturazione affettivo-cognitiva dell'esperienza scolastica. Come già sostenuto nella sezione I.3 la VR, proprio per la sua capacità immersiva, amplifica la risonanza emotiva, rendendo visibili e tangibili le traiettorie affettive dell'apprendimento. È compito dell'insegnante riconoscere e accompagnare tali dinamiche, traducendo l'attivazione in consapevolezza, e l'intensità in significato.

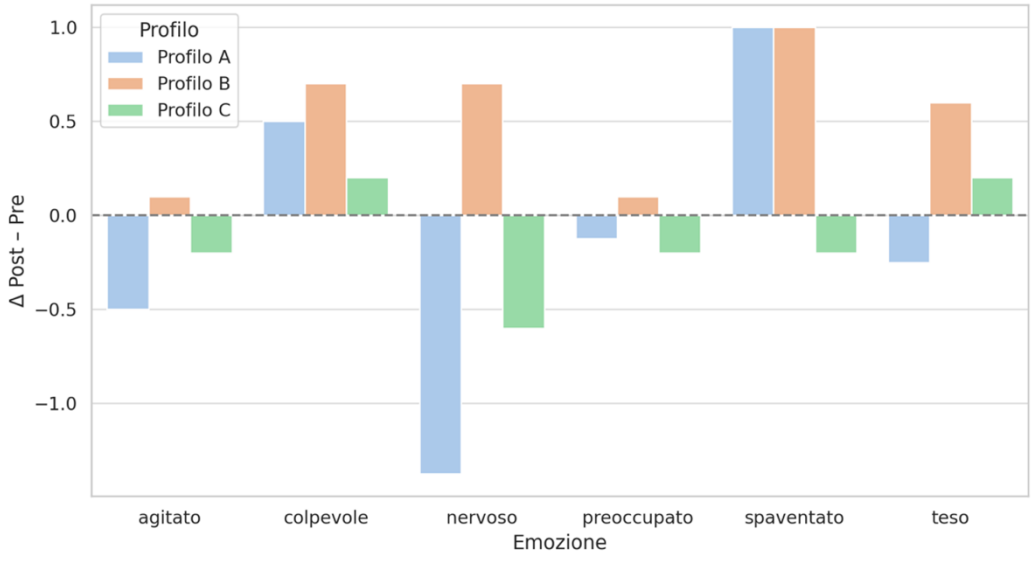


Grafico 14 - Variazione media (Δ) delle emozioni disforiche per profilo motivazionale

Infine, per concludere, nel grafico che segue si vede chiaramente l'incidenza dello stato emozionale con il profitto, le linee colorate, infatti,

mostrano le variazioni (Δ) in 6 emozioni chiave: attivo, ispirato, orgoglioso (positive), vergognato, colpevole, nervoso (negative). La linea nera tratteggiata rappresenta il rendimento scolastico (normalizzato per confronto visivo).

Si possono vedere facilmente quali studenti hanno profili "virtuosi" (emozioni positive, rendimento positivo) e quali mostrano dissonanze emotivo-cognitive (emozioni negative, rendimento negativo).

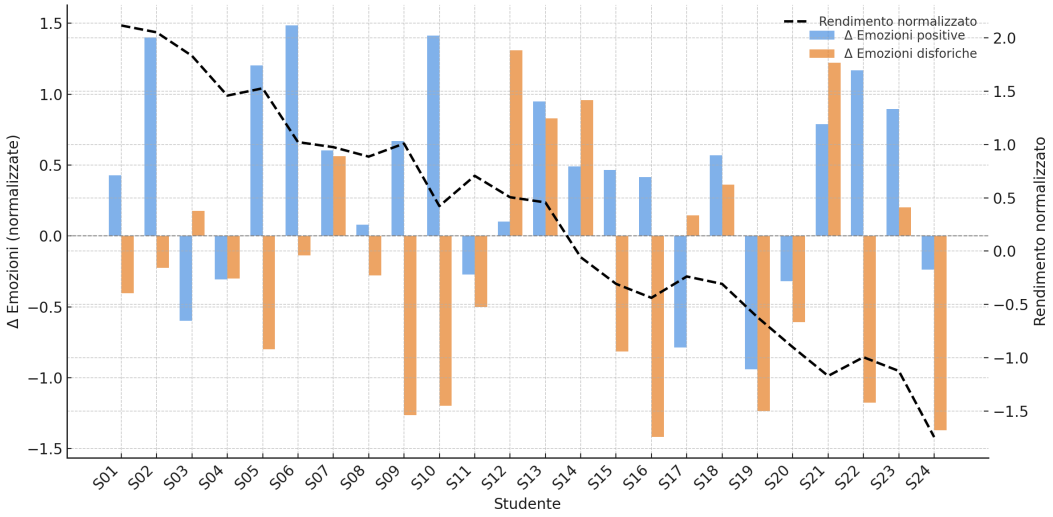


Grafico 15 - Profili affettivo-cognitivi individuali per ciascuno studente. Variazione emozionale associata al rendimento.

III.3.8 Differenze di genere nella variazione emozionale

Ulteriori elementi interpretativi sono emersi dal confronto tra maschi e femmine, che ha evidenziato alcune differenze nell'attivazione di specifiche emozioni. I maschi, in media, hanno registrato un aumento in emozioni ad alta valenza positiva e auto-espressiva (es. ispirato, entusiasta, orgoglioso), mentre le femmine hanno mostrato una maggiore variazione in emozioni disforiche o legate alla vulnerabilità relazionale (es. vergognato, spaventato).

Questa divergenza conferma quanto già discusso in letteratura circa la differente sensibilità emozionale e i diversi *pattern di coping* nei contesti educativi, nonché l'importanza di valutare le risposte emozionali in chiave

intrapersonale, tenendo conto non solo delle *performance* ma anche delle variabili personali e biografiche.

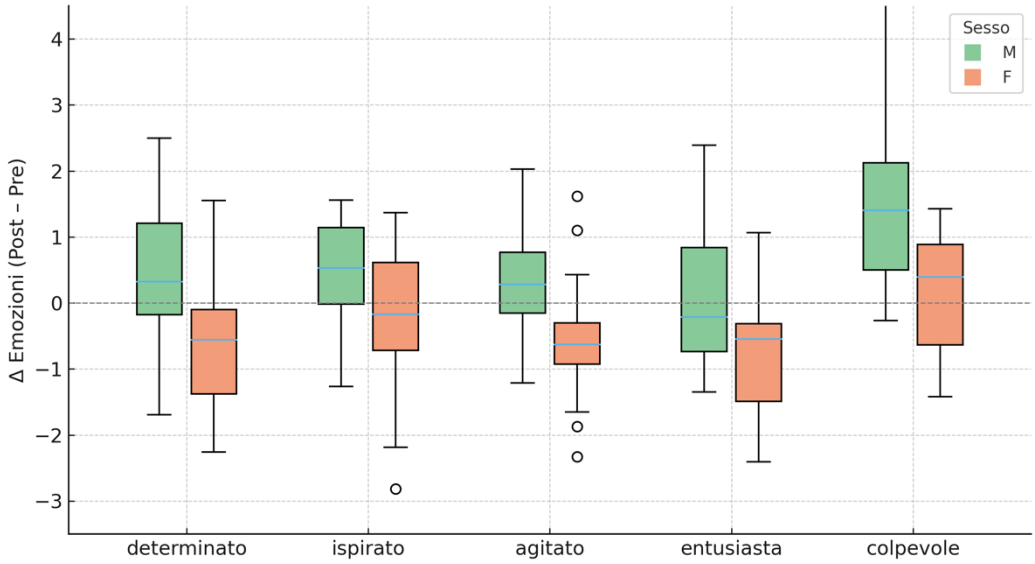


Grafico 16 - Differenze tra maschi e femmine nelle variazioni emozionali (Δ PANAS). Si osserva una tendenza generale dei soggetti maschili a presentare incrementi mediamente più elevati nelle emozioni positive rispetto alle femmine. L'andamento complessivo suggerisce una risposta emozionale più stabile nel gruppo femminile e una maggiore escursione dei vissuti nel gruppo maschile, pur in assenza di differenze statisticamente significative.

III.3.9 Implicazioni educative e prospettive di sviluppo

L'integrazione dei dati PANAS con le variabili di profitto e anagrafiche offre uno spaccato particolarmente ricco sulla complessità delle traiettorie emotive attivate dalla realtà immersiva.

I risultati sottolineano l'importanza di progettare ambienti educativi che non solo stimolino l'interesse e la curiosità, ma che promuovano una regolazione affettiva sostenibile, soprattutto per gli studenti più fragili.

Dal punto di vista pedagogico, emerge con forza la necessità di accompagnare l'innovazione tecnologica con dispositivi di lettura emozionale, osservazione qualitativa e supporto metacognitivo, affinché l'esperienza immersiva non si limiti a produrre effetti "*wow*", ma si traduca in un'occasione autentica di apprendimento trasformativo.

III.4 Analisi osservativa del percorso didattico: articolazione per dimensioni progettuali

Nell'ambito del presente disegno sperimentale, l'osservazione sistematica delle dieci lezioni ha rappresentato una componente essenziale per l'analisi dell'esperienza immersiva in chiave pedagogico-didattica. La griglia di osservazione, costruita secondo criteri di validità ecologica e coerenza con il *framework* teorico a partire dalla nota ministeriale del MIM n. 4588 del 24 ottobre 2023 nonché delle Linee guida STEM relative alle indicazioni metodologiche per le discipline STEM e dell'uso innovativo della tecnologia, è stata articolata in sei dimensioni fondamentali che riflettono la complessità del dispositivo educativo: (1) Contesto e Obiettivi della Lezione, (2) Metodologia Didattica, (3) Coinvolgimento degli Studenti, (4) Inclusività e Personalizzazione, (5) Collegamenti con il Mondo Reale, (6) Valutazione della Lezione.

Attraverso un sistema di codifica tricotomica (0=assente; 1=parzialmente presente; 2=pienamente presente), è stato possibile misurare l'attivazione concreta degli elementi osservati e, mediante aggregazione e visualizzazione grafica (radar tematici), restituire un profilo sintetico ma densamente informativo di ciascuna dimensione.

1. Contesto e Obiettivi della Lezione

Questa prima area, incentrata sulla chiarezza progettuale e sulla coerenza tra obiettivi dichiarati e attività svolte, ha evidenziato una elevata stabilità nei punteggi osservati. L'indicatore "Obiettivi comunicati" ha raggiunto in più occasioni il livello massimo, segnalando un'efficace comunicazione dell'intenzionalità didattica agli studenti. Allo stesso modo, la presenza costante di riferimenti alle discipline STEM e la strutturazione logica delle attività contribuiscono a delineare un contesto formativo riconoscibile e ben incorniciato.

2. Metodologia Didattica

La seconda dimensione ha restituito dati ampiamente positivi, riflettendo l'adozione di una didattica attiva, laboratoriale e supportata dalla tecnologia. L'uso dei visori VR ha trovato una progressiva integrazione nelle pratiche di insegnamento-apprendimento, con punteggi crescenti in indicatori come "Uso efficace dei visori" e "Attività significative e coerenti". Le attività pratiche sono state osservate in tutte le lezioni, a conferma di una intenzionalità pedagogica orientata all'apprendimento esperienziale e situato, coerente con i paradigmi costruttivisti e con i più recenti orientamenti della didattica immersiva.

3. Coinvolgimento degli Studenti

Il coinvolgimento attivo, inteso come partecipazione, *agency*, collaborazione tra pari e possibilità di riflessione, ha evidenziato un'evoluzione progressiva. Indicatori come "Collaborazione attiva" e "Domande e riflessione critica" mostrano un *trend* ascendente a partire dalla terza lezione, segno di un progressivo radicamento di pratiche dialogiche e cooperative all'interno del gruppo classe. Questo andamento suggerisce che l'ambiente immersivo, oltre a stimolare la curiosità individuale, favorisce la costruzione di una comunità di apprendimento, nella quale gli studenti si sentono parte attiva del processo formativo.

4. Inclusività e Personalizzazione

Questa dimensione rappresenta uno dei punti più critici dell'intervento. Gli indicatori relativi a "Adattamenti per DSA/disabilità", "Tecnologie per personalizzazione" e "Attività personalizzate" presentano punteggi costantemente bassi o assenti. Nonostante la VR offra, almeno in potenza, possibilità significative di personalizzazione, nella pratica osservata tale potenziale non è stato pienamente attivato. Questo evidenzia un *gap* tra l'inclusività dichiarata a livello progettuale e quella effettivamente implementata, richiamando la necessità di un *design* didattico più attento alle differenze individuali e capace di valorizzare l'eterogeneità come risorsa, anche in ambienti ad alto tasso tecnologico.

5. Collegamenti con il Mondo Reale

La quinta area ha restituito un quadro intermedio. Le attività osservate si sono mostrate frequentemente collegate a contesti concreti, ma non sempre radicate in problematiche del quotidiano o orientate a far emergere la valenza civica, lavorativa o trasversale dei contenuti. Gli indicatori "Collegamento con lavoro o vita", "Competenze trasversali" e "Applicazioni reali" mostrano valori tra 1 e 1.5, segno di una presenza parziale ma non sistemica di elementi di transfer e autenticità. La VR sembra qui operare prevalentemente come ambiente esperienziale interno alla didattica, più che come finestra aperta sul mondo, suggerendo l'utilità di un'integrazione più esplicita tra contenuti disciplinari e scenari di realtà aumentata.

6. Valutazione della Lezione

L'ultima dimensione osservativa riguarda l'efficacia complessiva del percorso, valutata attraverso indicatori come "Raggiungimento degli obiettivi", "Acquisizione di nuove competenze" e "Presenza di *feedback* o autovalutazione". I dati raccolti mostrano una buona *performance* nei primi due indicatori, specialmente nella seconda metà del percorso, a indicare una progressiva maturazione degli apprendimenti. Tuttavia, la voce relativa alla valutazione formativa/autovalutativa permane su livelli medi, suggerendo la necessità di strutturare con maggiore sistematicità momenti di metariflessione, sia individuale che collettiva, all'interno del *setting* immersivo.

L'analisi osservativa conferma l'efficacia del percorso didattico nel promuovere una didattica innovativa, coinvolgente e metodologicamente solida, ma segnala al contempo aree di miglioramento strategico, soprattutto in termini di inclusività e connessione con il mondo reale. La polarizzazione tra dimensioni forti e dimensioni deboli suggerisce che l'introduzione di ambienti VR non è di per sé garanzia di equità, pertinenza o significatività didattica. È necessaria una regia pedagogica consapevole e intenzionale, capace di integrare il potenziale tecnologico con visioni

educative orientate alla personalizzazione, alla cittadinanza e all'accessibilità.

In prospettiva, l'uso di radar tematici per ciascuna dimensione osservativa si rivela uno strumento altamente efficace per la valutazione formativa del percorso, e offre una base solida per l'elaborazione di modelli replicabili e adattabili in contesti educativi diversi. L'osservazione sistemica si configura così come uno snodo cruciale nella logica *mixed methods*, permettendo la triangolazione tra dati quantitativi, qualitativi e processuali, e contribuendo a delineare una cornice interpretativa densamente pedagogica dell'innovazione in atto (Clark & Ivankova, 2015).

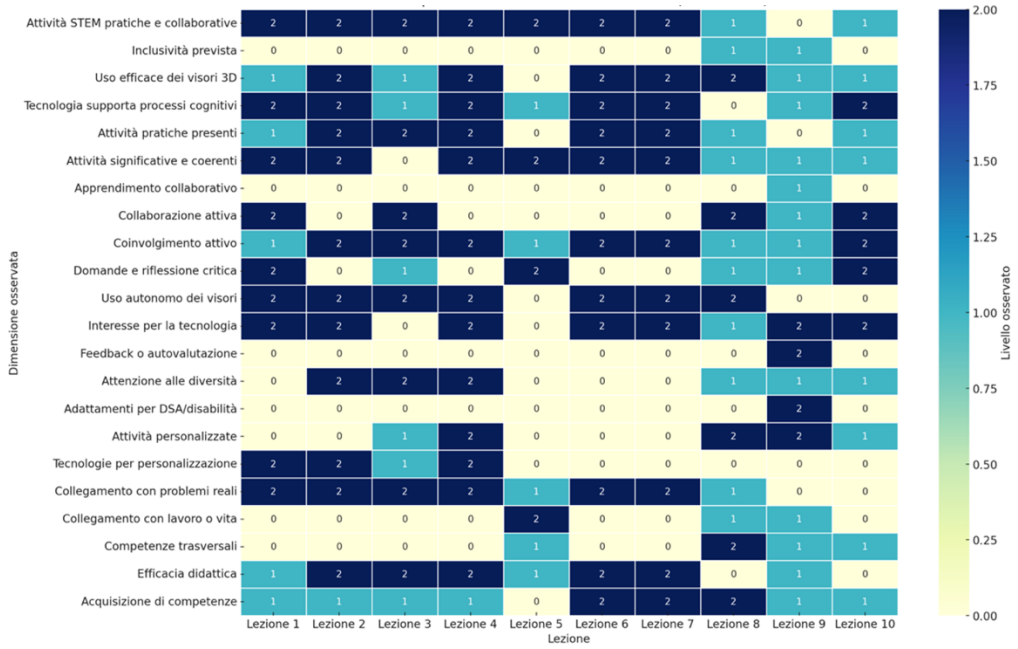


Grafico 17 - Heatmap evolutiva delle dimensioni osservate durante le dieci sessioni di lavoro.

III.4.1 Triangolazione integrata: osservazioni didattiche, emozioni e motivazione

La triangolazione tra i dati osservativi, le variazioni emotive (PANAS) e le modificazioni motivazionali (AMOS) consente di delineare un quadro interpretativo stratificato, capace di valorizzare la convergenza tra fonti, di evidenziare eventuali dissonanze e di sostenere inferenze di tipo pedagogico.

L'analisi ha posto particolare attenzione alla fase finale del percorso didattico (lezioni 8-10), in cui si osserva l'atterraggio dell'esperienza formativa, un momento chiave per valutare l'impatto dell'intervento sia in termini di processi che di esiti. La sintesi grafica restituisce un confronto diretto tra i valori medi delle sei dimensioni osservate, le variazioni affettive emerse dal PANAS e le trasformazioni auto-percepite delle variabili motivazionali secondo AMOS.

Come già emerso nella sezione precedente, la qualità osservata dell'intervento nella fase finale mostra una configurazione articolata, con elevato il coinvolgimento degli studenti (media 1.17) e buona la dimensione metodologica (1.00), ma si rileva un crollo nella chiarezza degli obiettivi (0.67) e una fragilità strutturale nella valutazione e nel collegamento con il mondo reale (0.80). Questa polarizzazione suggerisce che, pur in presenza di un forte *engagement* attivo, la dimensione progettuale e metacognitiva risulta meno esplicitata o meno curata nella fase conclusiva.

Fase	*Contesto e Obiettivi*	*Metodologia Didattica*	*Coinvolgimento Studenti*	*Inclusività e Personalizzazione*	*Collegamenti con il Mondo Reale e Valutazione*
Iniziale	2.00	1.33	1.00	0.67	0.93
Centrale	2.00	1.39	0.56	0.30	1.10
Finale	0.67	1.00	1.17	0.80	0.80

Tabella 3 - Statistiche descrittive delle dimensioni osservative, raggruppate per le tre fasi del percorso didattico

III.4.2 Dati PANAS: dissonanza tra coinvolgimento e benessere emotivo

L'analisi dei dati PANAS, ricalibrata sulla base della segmentazione per fasi del percorso didattico (iniziale e finale), consente di restituire una lettura più fine e stratificata dell'evoluzione affettiva degli studenti, in stretta connessione con i dati osservativi raccolti in itinere. In netta discontinuità rispetto all'interpretazione iniziale, che ipotizzava un calo generalizzato delle emozioni positive e un incremento lineare di quelle

disforiche, la nuova articolazione dei dati evidenzia una dinamica bifasica, nella quale l'attivazione emotiva positiva si presenta con intensità significativa nella fase iniziale (+0.41), per poi decrescere sensibilmente nella fase conclusiva (-0.35), in corrispondenza di un contestuale aumento delle emozioni negative (+0.36), in particolare di tipo auto-riflessivo (colpa, vergogna, tensione).

Questa fluttuazione affettiva, se letta in parallelo all'evoluzione delle dimensioni osservate in aula, suggerisce che la fase introduttiva dell'esperienza, caratterizzata da chiarezza progettuale, coerenza metodologica e uso intenzionale delle tecnologie, abbia attivato nei discenti elevati livelli di entusiasmo, determinazione, vigilanza e autoefficacia emotiva, configurandosi come un contesto favorevole all'emergere di emozioni agentiche, congruenti con un'esperienza didattica motivante e cognitivamente coinvolgente.

Fase	Δ Emozioni Positive	Δ Emozioni Negative
Iniziale	+0.41	-0.20
Finale	-0.35	+0.36

Tabella 4 - Δ delle dimensioni emotive, raggruppate per le fasi iniziale e finale.

Tuttavia, nella fase finale, a fronte di un aumento del coinvolgimento osservato e della partecipazione attiva, si registra un deflusso significativo di emozioni positive e un aumento tangibile delle componenti disforiche. Tale disallineamento apparente tra attivazione comportamentale e benessere soggettivo può essere interpretato alla luce di alcune criticità nella strutturazione dell'azione didattica, che emergono con evidenza dalle osservazioni sistematiche. In particolare, il progressivo avvicinarsi del momento valutativo, la mancanza di spazi di riflessione metacognitiva e l'assenza di *feedback* formativo potrebbero aver limitato la possibilità, per alcuni studenti, di elaborare l'esperienza vissuta in termini di crescita percepita e di valorizzazione personale.

In altri termini, l'esperienza educativa, seppur immersiva, esperienziale e coinvolgente, si rivela non pienamente trasformativa se non supportata da strategie di esplicitazione, autovalutazione e rielaborazione affettivo-

cognitiva. Il rischio, come evidenziato da alcuni profili emotivi, è che l'assenza di una cornice valutativa significativa e di uno sguardo docente orientato all'accompagnamento critico possa generare confusione, frustrazione o senso di inadeguatezza, nonostante l'apparente partecipazione attiva. Si configura, dunque, un caso emblematico di dissonanza tra comportamento osservabile e vissuto soggettivo, che sottolinea ancora una volta l'importanza di integrare in modo sinergico tecnologie, metodologia e dispositivi riflessivi, al fine di promuovere un'esperienza didattica realmente significativa e affettivamente sostenibile.

È indispensabile considerare pure che la fase finale è stata caratterizzata da due momenti di valutazione, che seppur immaginiamo essere gestione emotiva quotidiana per gli studenti, potrebbero, in una certa misura aver influenzato lo stato di ansia negativo e quindi fatto registrare un aumento nelle misure di *self-report* negative.

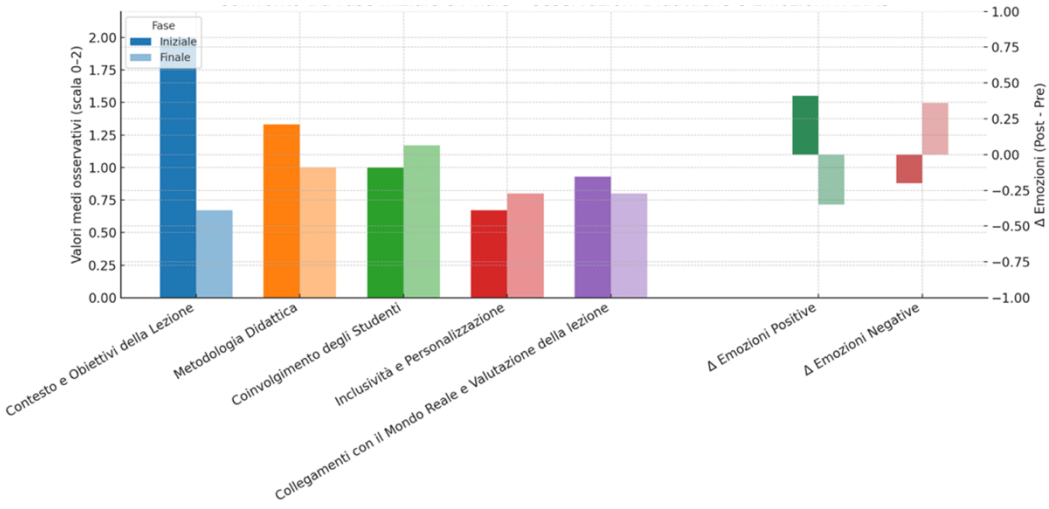


Grafico 18 - Triangolazione tra le osservazioni didattiche e le variazioni emotive (PANAS) aggregate per fase.

III.4.3 Dati AMOS: rafforzamento della *self-perception* e apertura al cambiamento

Coerentemente con l'andamento emotivo, i dati raccolti tramite il questionario AMOS restituiscono un quadro ancor più incoraggiante. Tutte le dimensioni fanno registrare variazioni positive, con particolare riferimento a: 1) Teoria della personalità (+0.57), gli studenti si dichiarano

più propensi a considerare i tratti personali come modificabili e migliorabili, segno di una maggiore apertura al cambiamento; 2) Fiducia nella personalità e percezione dell'abilità (+0.30 e +0.22): l'esperienza ha contribuito a rafforzare auto-efficacia e *agency* personale, in modo trasversale; 3) Obiettivi di apprendimento (+0.26): sebbene non esplicitati sempre durante le lezioni, gli studenti sembrano aver interiorizzato il senso del percorso.

Questi dati confermano che, al di là dell'esperienza emotiva contingente, l'intervento ha prodotto effetti trasformativi di medio termine sulle dimensioni motivazionali profonde, segnalando una plasticità cognitiva e affettiva significativa.

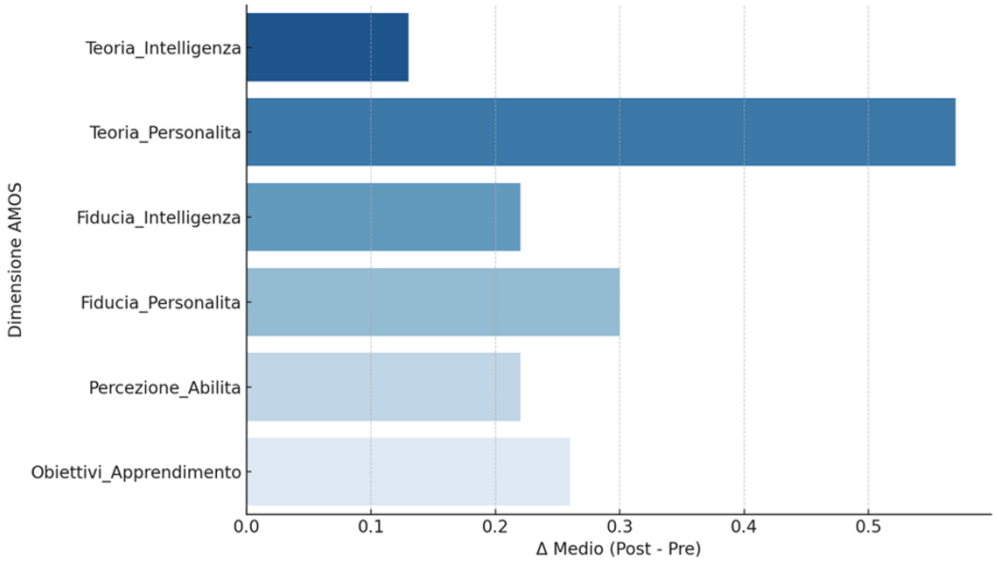


Grafico 19 - Variazioni medie (Δ) delle dimensioni AMOS pre–post per tutti gli studenti.

Questo tipo di triangolazione integrata consente di delineare tre livelli interconnessi. Il primo relativo alla parte processuale (osservazione), nel qualesi evidenzia che l'intervento ha mostrato coerenza metodologica e coinvolgimento attivo, ma ha perso in strutturazione e riflessività nella fase finale. Una seconda parte di natura affettiva (PANAS) in cui le emozioni positive non si sono rafforzate, mentre le disforiche sono aumentate, suggerendo una dissonanza emotiva latente, legata all'assenza di *feedback* o riconoscimento e fortemente legata alla parte conclusiva di valutazione.

Ed un terzo aspetto, quello motivazionale (AMOS) in cui gli studenti hanno modificato in senso positivo le proprie rappresentazioni, mostrando una disposizione alla crescita e all'apprendimento autoregolato.

Questi tre livelli, pur divergenti in alcuni punti, convergono nel delineare un apprendimento trasformativo, un'esperienza formativa che ha agito in profondità ma che, per diventare realmente significativa, avrebbe richiesto una maggior cura dei momenti riflessivi, valutativi e metacognitivi.

III.5 Il focus group

L'analisi qualitativa delle trascrizioni del *focus group* è stata condotta mediante codifica tematica, secondo l'approccio di Braun e Clarke (2006), supportata dalla piattaforma QCAmap, gratuita, e basato su browser, utilizzabile per analisi qualitativa con codifica deduttiva e induttiva, che ha consentito la categorizzazione sistematica dei dati e la costruzione dei temi emersi.

III.5.1 Analisi tematica del focus group

L'analisi qualitativa dei dati emersi dal *focus group*, condotto al termine della sperimentazione didattica, ha consentito di esplorare in profondità le percezioni soggettive degli studenti coinvolti. La trascrizione integrale è stata sottoposta ad un'analisi tematica di tipo induttivo-deduttivo, al fine di individuare nuclei di senso ricorrenti e categorizzati in sette temi principali. I nuclei tematici che hanno caratterizzato il *focus group* sono stati la "chiarezza concettuale e rappresentazione tridimensionale", la "manipolazione, interattività e coinvolgimento operativo", il "confronto con la lezione tradizionale", la "motivazione e atteggiamento verso lo studio", i, "limiti tecnici e disagi individuali", la "collaborazione e presenza sociale" e alcuni "suggerimenti di miglioramento". Tali temi, emergenti dalla narrazione spontanea degli studenti, restituiscono una visione articolata dell'esperienza vissuta con l'ambiente immersivo in realtà virtuale.

Uno dei nuclei concettuali maggiormente ricorrenti riguarda la percezione di una maggiore chiarezza e accessibilità dei contenuti disciplinari. Gli studenti hanno esplicitamente dichiarato che l'utilizzo del visore ha facilitato la comprensione di concetti notoriamente astratti, quali la struttura atomica o il bilanciamento delle reazioni chimiche. La possibilità di osservare visivamente e tridimensionalmente tali strutture ha permesso una riorganizzazione cognitiva del contenuto, veicolando una forma di apprendimento incarnato e visivo, difficilmente attivabile nella lezione frontale. In tal senso, il visore si è configurato come artefatto epistemico, capace di amplificare la visibilità concettuale e la decodifica delle rappresentazioni simboliche tipiche della chimica.

Strettamente correlato al tema precedente è l'emergere del valore attribuito all'interazione con gli oggetti virtuali. La possibilità di manipolare direttamente atomi, elettroni, protoni e componenti della tavola periodica ha attivato negli studenti dinamiche operative assimilabili al contesto laboratoriale. Tale dimensione manipolativa, tuttavia, risulta potenziata dalla possibilità di sperimentare in un ambiente sicuro, controllato e ripetibile. L'esperienza è percepita non solo come "divertente", ma soprattutto come formativa e significativa, in quanto capace di mobilitare conoscenze in azione, promuovendo un apprendimento attivo e trasformativo.

Il confronto implicito, e spesso esplicito, tra la lezione tradizionale e quella fruita in modalità immersiva ha messo in luce un marcato scarto in termini di attenzione, motivazione e comprensione. Gli studenti lamentano, nelle lezioni frontali, la prevalenza di una trasmissione unidirezionale, l'assenza di elementi visuali e la difficoltà a mantenere la concentrazione. L'esperienza con la realtà virtuale, al contrario, viene descritta come coinvolgente, dinamica e più vicina alla dimensione esperienziale del laboratorio, indicando un superamento della dicotomia tra teoria e pratica e una più immediata accessibilità dei contenuti.

Molti studenti hanno riferito un incremento motivazionale nei confronti della chimica, tradizionalmente percepita come un insegnamento complesso. L'effetto motivazionale non è riconducibile alla sola "novità"

tecnologica, ma appare legato a un cambiamento dell'atteggiamento verso lo studio, che diviene più partecipato, intenzionale e curioso. L'esperienza immersiva sembra attivare non solo il canale cognitivo, ma anche quello affettivo ed emotivo, favorendo un *engagement* profondo. La ricorrenza dell'assunto "mentre ti diverti apprendi" testimonia la presenza di uno stato di *flow*, compatibile con i presupposti dell'apprendimento significativo.

L'indagine qualitativa ha messo in luce anche alcune criticità di ordine tecnico e personale. Tra queste, gli studenti segnalano malesseri fisici (es. affaticamento visivo, mal di testa), difficoltà nella regolazione del visore per chi porta gli occhiali, e una iniziale disorientamento nell'utilizzo dell'interfaccia. Alcuni hanno evidenziato la barriera linguistica dovuta alla presenza del *software* in lingua inglese, richiedendo, in ottica inclusiva, la possibilità di una doppia lingua. Tali aspetti, pur non inficiando l'efficacia complessiva dell'esperienza, delineano ambiti di miglioramento legati all'ergonomia e all'accessibilità dell'ambiente virtuale.

Un tema trasversale ma significativo riguarda la percezione di isolamento vissuta all'interno dell'ambiente virtuale. Gli studenti dichiarano l'assenza di interazioni tra pari e l'impossibilità di vedere i propri compagni durante lo svolgimento degli esercizi. Tale condizione è percepita come limitante, poiché ostacola il confronto e la costruzione collaborativa del sapere. Emergono proposte di implementazione di *avatar* personalizzati e ambienti multiutente, capaci di replicare le dinamiche relazionali della classe reale. In questa direzione, la presenza sociale e la collaborazione sono riconosciute come elementi strategici per rendere l'esperienza più autentica, partecipativa e inclusiva.

Infine, gli studenti hanno avanzato numerose proposte migliorative, evidenziando un atteggiamento riflessivo e proattivo nei confronti dell'innovazione didattica. Tra le richieste più frequenti vi sono state l'estensione dell'esperienza ad altre discipline (es. fisica, storia, geografia), l'aumento del monte ore a disposizione, l'introduzione di traduzioni in lingua italiana, e il perfezionamento delle impostazioni iniziali del visore. Le osservazioni raccolte suggeriscono che gli studenti non solo hanno beneficiato dell'esperienza, ma si sono sentiti pienamente legittimati ad

agire come co-progettisti del proprio apprendimento, indicando direzioni concrete per la progettazione futura di ambienti educativi in realtà virtuale.

III.5.2 Approfondimento tematico per contenuto e grado di partecipazione

L'analisi qualitativa è stata ulteriormente approfondita attraverso una lettura incrociata delle risposte in funzione di due assi interpretativi. Da un lato, i contenuti specifici della disciplina menzionati dagli studenti (quali la struttura atomica, il bilanciamento chimico, la tavola periodica e l'esperienza laboratoriale virtuale); dall'altro, il grado di partecipazione individuale alla discussione, misurato sulla base della frequenza degli interventi. Tale approccio ha permesso di cogliere sfumature significative nelle percezioni e nei vissuti degli studenti, restituendo una mappa più articolata dell'esperienza didattica vissuta.

Tra i contenuti maggiormente citati, la struttura atomica ricorre con frequenza e viene percepita come più comprensibile, concreta e facilmente manipolabile grazie alla realtà virtuale. Gli studenti dichiarano esplicitamente di aver compreso per la prima volta la relazione tra massa atomica e composizione nucleare grazie alla rappresentazione 3D dell'atomo, con la possibilità di manipolare direttamente i protoni, neutroni ed elettroni. In più casi, è stato enfatizzato il fatto che la manipolazione dell'atomo (aggiunta o rimozione di particelle) abbia generato un'esperienza di apprendimento attivo, profondamente diversa dall'ascolto passivo della lezione frontale o dalla visualizzazione passiva di un video.

Anche il bilanciamento è stato oggetto di riflessione da parte degli studenti, ma con percezioni leggermente differenti. Se da un lato la rappresentazione grafica delle molecole "a destra e a sinistra" ha favorito una maggiore chiarezza del concetto, dall'altro è emersa una certa complessità nel processo stesso di comprensione e interazione. In particolare, l'efficacia del visore è stata riconosciuta nella possibilità di vedere in modo simultaneo la composizione degli elementi reagenti e dei loro prodotti, ma alcuni studenti hanno comunque segnalato la difficoltà nel

controllare la correttezza delle proporzioni, specie senza guida docente in tempo reale. Il bilanciamento, dunque, pur beneficiando della componente visiva, mantiene una carica cognitiva maggiore, che richiede strategie didattiche mirate.

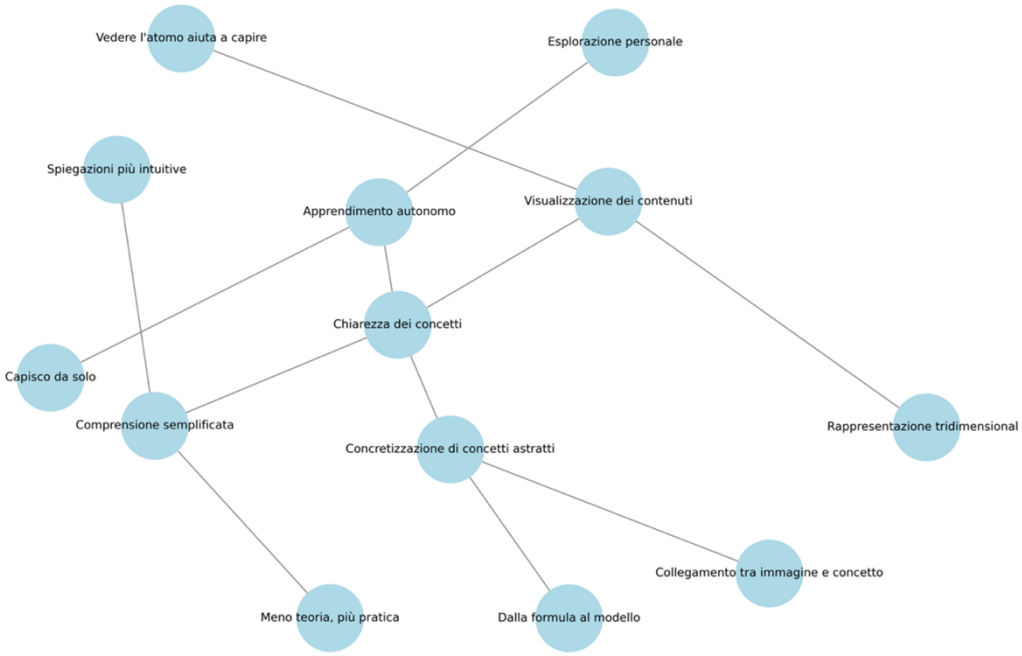
La tavola periodica è stata spesso menzionata nel contesto della manipolazione diretta degli elementi, e viene percepita positivamente come supporto alla costruzione di relazioni tra simboli e proprietà chimiche. Allo stesso modo, la simulazione di attività laboratoriali virtuali, come la creazione di sostanze chimiche, è stata apprezzata per la sua natura immersiva e operativa, ritenuta in alcuni casi persino superiore alla lezione svolta in laboratorio fisico, per la possibilità di ripetere senza rischio le reazioni e di intervenire direttamente sul processo.

L'incrocio tra contenuti e grado di partecipazione mostra un dato rilevante. Gli studenti con un elevato numero di interventi tendono ad articolare considerazioni più complesse, integrate e riflessive. Essi non si limitano a esprimere giudizi di gradimento, ma analizzano l'esperienza in relazione a strategie di apprendimento, aspetti cognitivi ed emotivi, criticità tecniche e potenzialità didattiche. In alcuni casi, sono proprio questi studenti a proporre soluzioni concrete per migliorare l'ambiente virtuale (es. introduzione di *avatar*, ambienti multiutente, guida in lingua italiana, ampliamento del monte ore).

Al contrario, i relatori con partecipazione bassa tendono a formulare risposte brevi, spesso centrate sulla piacevolezza o sulla novità dell'esperienza, senza sviluppare riflessioni approfondite sulle implicazioni educative o sulle dinamiche di apprendimento attivate. Tale differenziazione evidenzia come il grado di coinvolgimento nel *focus group* rispecchi, in parte, anche la profondità del vissuto esperienziale e la capacità metacognitiva dei partecipanti.

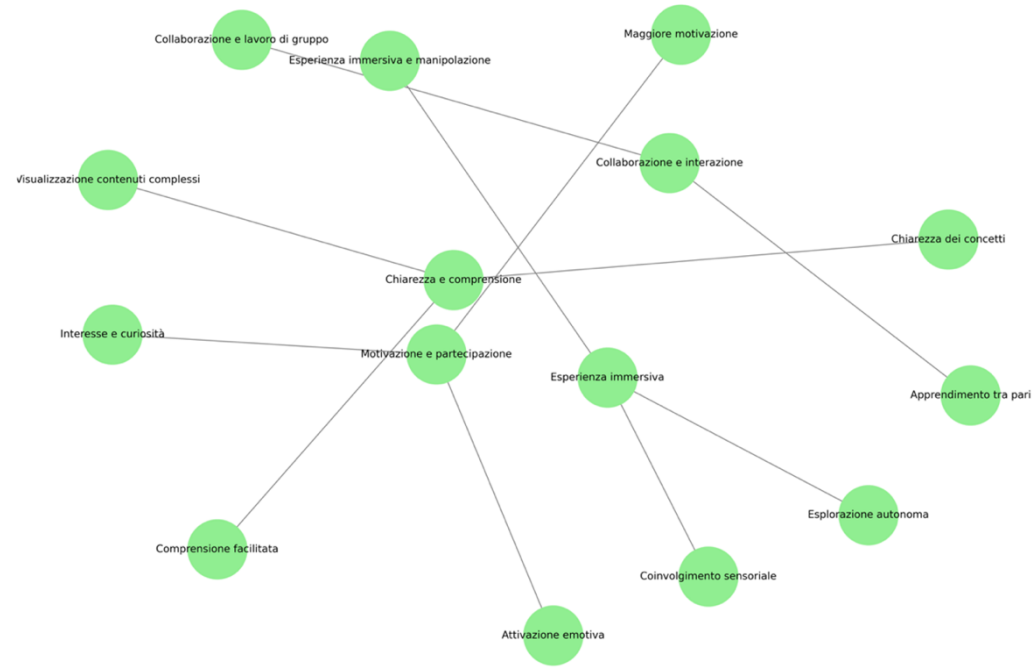
Attraverso questa lettura trasversale si delinea un'evidente interconnessione tra contenuti affrontati, strategie cognitive messe in atto e dimensione emozionale. I concetti visivamente accessibili, come l'atomo e le sue componenti, attivano nei partecipanti un senso di autoefficacia, curiosità e padronanza; al contrario, i contenuti che richiedono operazioni

mentali più complesse (es. il bilanciamento quantitativo) generano un *mix* di maggiore impegno cognitivo e necessità di supporto. Tuttavia, anche nei casi più complessi, la presenza di *feedback* immediati e ambienti interattivi sembra mitigare la frustrazione e sostenere l'apprendimento attraverso il gioco, la manipolazione e l'esperienza diretta.



Mappa Concettuale 1 - Rappresentazione grafica dei temi principali del focus group, realizzata in QCAMAP.

Ai temi principali, "chiarezza e comprensione", "collaborazione e interazione", "esperienza immersiva" e "motivazione e partecipazione", si affiancano una serie di codici secondari quali "chiarezza dei concetti", "comprensione facilitata", "visualizzazione contenuti complessi", "collaborazione e lavoro di gruppo", "apprendimento tra pari", "esperienza immersiva", "manipolazione", "coinvolgimento sensoriale", "esplorazione autonoma", "maggiore motivazione", "interesse e curiosità", "attivazione emotiva".



Mappa Concettuale 2 - Rappresentazione grafica dei codici secondari collegati ai temi principali, realizzata in QCAMAP.

III.6 Interpretazione dei risultati: una lettura triangolata tra vissuti, emozioni e motivazioni

Nel contesto epistemologico della presente ricerca, l'articolazione di un disegno metodologico a matrice *mixed methods*, nella sua declinazione sequenziale esplicativa integrata, ha consentito di valorizzare pienamente la dialettica tra dati quantitativi (AMOS e PANAS) e risultati qualitativi (*focus group*), ponendo l'accento non tanto su una mera convergenza numerica, quanto su una triangolazione interpretativa capace di restituire la profondità fenomenologica dell'esperienza didattica mediata da tecnologie immersive. In tale direzione, l'analisi congiunta dei due domini evidenzia non solo punti di intersezione significativi, ma anche dissonanze rivelatrici e correlazioni implicite, che interrogano la complessità delle trasformazioni educative prodotte dall'integrazione di ambienti VR nei percorsi di apprendimento scientifico.

III.6.1 Motivazione scolastica e *agency* percepita: convergenze tra AMOS e temi narrativi

L'analisi dei dati quantitativi raccolti attraverso il questionario AMOS, articolato nelle sei dimensioni, ha evidenziato, come precedentemente discusso, l'assenza di differenze statisticamente significative nel confronto pre-post. Tuttavia, proprio il confronto con le dimensioni emerse dal focus group consente di riattivare il potenziale euristico dei dati AMOS, rivelando connessioni latenti e traiettorie di senso non immediatamente riscontrabili nei valori aggregati.

Un primo asse di convergenza si articola attorno al tema della chiarezza concettuale, emerso con elevata frequenza nel focus group. Gli studenti, attraverso enunciati quali "vedere l'atomo in 3D mi ha aiutato a capire davvero" o "ora so cosa sto bilanciando", delineano un'esperienza di comprensione che si radica nella visualizzazione immersiva come strumento di riduzione della distanza astratto-concreto. Tale percezione si riflette nelle dimensioni AMOS di motivazione intrinseca e interesse per lo studio, che pur senza un incremento significativo, mostrano tendenze di stabilità o lieve aumento. In questo senso, la trasformazione semiotica operata dalla realtà virtuale agisce come vettore di significatività, alimentando la motivazione proprio là dove il contenuto disciplinare assume valenza esperienziale.

Ulteriori elementi di intersezione si rintracciano nell'area della autonomia e autodeterminazione, trasversale a più codici emersi quali "capisco da solo", "posso esplorare come voglio". Tali dichiarazioni testimoniano un rafforzamento dell'*agency* percepita, coerente con le dimensioni AMOS relative a attribuzione causale interna e fiducia nelle proprie capacità. È significativo osservare come, per alcuni studenti, l'ambiente immersivo abbia permesso un riposizionamento del proprio ruolo nel processo di apprendimento, in un'ottica meno eterodiretta e più esplorativa. Sebbene questi dati non abbiano assunto consistenza numerica sul piano delle medie di scala, la loro presenza ricorrente nel *focus group* indica una risonanza soggettiva elevata, e rafforza l'ipotesi che l'ambiente

VR abbia favorito forme di motivazione autoregolata, difficilmente misurabili in tempi brevi o con strumenti standardizzati.

Un'ulteriore convergenza emerge nell'ambito delle dimensioni sociali dell'apprendimento, che nei dati AMOS si riflettono parzialmente nei costrutti di impegno e perseveranza, mentre durante il focus group con gli studenti si è giunti a forme più ricche e situate, come "lavorare in coppia col visore", "aiutarsi tra pari", o "spiegarsi a vicenda i passaggi". Queste pratiche relazionali, descritte con enfasi positiva, attestano non soltanto un coinvolgimento cognitivo, ma anche un investimento affettivo nell'interazione.

III.6.2 Emozioni positive e disforiche: lettura affettiva integrata dei dati PANAS

Anche sul piano emotivo, l'integrazione tra dati PANAS e narrazioni qualitative restituisce una trama interpretativa più ricca di quella desumibile dal solo confronto numerico t1(pre) e t2(post). Come emerso in precedenza, l'unica variazione statisticamente significativa ha riguardato l'emozione "colpa", aumentata nel post-test. A fronte di ciò, il *focus group* suggerisce di ricondurre tale incremento, non tanto a sentimenti di responsabilità morale, quanto a forme di disagio legato a difficoltà tecniche, al senso di non riuscire pienamente a sfruttare il potenziale dell'esperienza, o a momenti di confusione iniziale. Enunciati quali "mi sono sentita un po' persa all'inizio" o "non sapevo se stavo facendo bene" suggeriscono un'esperienza affettiva complessa, oscillante tra entusiasmo e disorientamento, che l'etichetta "colpa" cattura solo in parte.

Viceversa, emozioni positive quali entusiasmo, ispirazione, eccitazione, pur non emergendo come significativamente aumentate nel questionario, sono ampiamente evocate nel discorso degli studenti. La ricorrenza di espressioni come "mi è piaciuto moltissimo guardare dentro l'atomo" o "sembrava di essere dentro una reazione chimica" indica un elevato livello di attivazione affettiva positiva, associata all'esperienza immersiva. In questo senso, si evidenzia una asimmetria tra misurazione e vissuto, che

suggerisce la necessità di strumenti emotivi più sensibili al contesto e alla specificità dell'esperienza tecnologico-didattica.

Un caso emblematico di tale disallineamento è rappresentato dall'emozione "determinazione", riportata in modo marginale nel PANAS, ma fortemente tematizzata nei *focus group* attraverso espressioni come "ci ho messo impegno per capire davvero", "volevo riuscire a bilanciare bene la reazione". Ciò conferma come le emozioni legate al senso di padronanza e al superamento della difficoltà, sebbene non sempre salienti nei questionari, costituiscano un nucleo affettivo centrale per l'*engagement* cognitivo.

Accanto alle convergenze precedentemente discusse, l'analisi integrata rivela anche dissonanze significative. La più evidente riguarda l'apparente stabilità dei punteggi AMOS rispetto alla ricchezza e alla varietà del vissuto narrato. Tale discrepanza può essere interpretata almeno secondo due chiavi di lettura. Da un lato, la limitata durata dell'intervento sperimentale potrebbe non aver attivato mutamenti profondi e misurabili nella motivazione scolastica generale. Dall'altro, è possibile che l'efficacia formativa dell'ambiente VR si manifesti più chiaramente a livello situato, episodico e affettivamente connotato, piuttosto che in termini di disposizioni stabili.

Una seconda dissonanza emerge nella percezione soggettiva del carico cognitivo, non sempre rispecchiata nei dati quantitativi. Alcuni studenti hanno riferito momenti di affaticamento visivo, difficoltà di manipolazione, o distrazione dovuta all'effetto immersivo, aspetti che non trovano corrispondenza nei questionari, ma che possono aver influito indirettamente sul vissuto motivazionale ed emotivo.

Infine, merita attenzione l'assenza di *item* specifici nei questionari relativi alla dimensione collaborativa e alla relazione intersoggettiva, che nei *focus group* emergono come elementi chiave dell'*engagement*. Tale mancanza sottolinea la necessità di strumenti più sensibili alle dinamiche socio-emotive, specie in contesti didattici ad alto tasso di interazione tecnologica.

III.6.4 Il focus group come chiave ermeneutica del dato numerico

Alla luce di quanto emerso, si può affermare che il *focus group* ha svolto una funzione eminentemente ermeneutica, ponendosi come spazio discorsivo in cui il dato numerico ha trovato articolazione, spiegazione e in alcuni casi persino contestazione. La narrazione degli studenti ha permesso di ridefinire le traiettorie interpretative dei questionari, evidenziando la necessità di considerare la motivazione scolastica non solo come costrutto psicometrico, ma anche come esperienza situata, narrabile e contestualmente modulata. Allo stesso modo, le emozioni non possono essere ridotte a mere etichette lessicali, ma devono essere comprese nella loro valenza processuale, all'interno di dinamiche educative complesse.

La costruzione di mappe concettuali, così come la matrice incrociata tra codici qualitativi e dimensioni AMOS/PANAS, ha contribuito a delineare una semantica multidimensionale, in cui i dati non si sommano, ma si spiegano reciprocamente. In tal modo, l'integrazione tra fonti consente di superare la dicotomia tra "quantitativo" e "qualitativo", restituendo una visione olistica dell'esperienza educativa, fondata sulla convergenza tra oggettività misurata e soggettività narrata.

III.7 La VR come facilitatore cognitivo: impatto sui risultati di apprendimento disciplinare

Una delle ipotesi più significative su cui si è articolata la presente ricerca (H3) concerne la funzione della realtà virtuale come facilitatore cognitivo, in grado di sostenere la comprensione dei concetti astratti tipici delle discipline STEM, e in particolare della chimica. Per verificarne la plausibilità, si è proceduto al confronto tra i risultati di profitto conseguiti dagli studenti nel primo quadrimestre, prima dell'intervento, e quelli ottenuti al termine del percorso didattico svolto in ambiente immersivo. Va precisato che la prova pratica con il visore è stata svolta all'interno del percorso didattico strutturato, mentre la prova scritta è stata svolta due

settimane dopo l'ultimo incontro per consentire il tempo di sedimentazione delle conoscenze, come vuole la prassi disciplinare.

L'analisi ha evidenziato un incremento delle *performance*, con una media passata da 5.92 (PRE) a 6.73 (POST), e una variazione media complessiva pari a +0.82 punti. Il test t per campioni appaiati ha restituito un valore di t = 4.28, con una significatività statistica p = .00028, che consente di affermare con sufficiente robustezza che il miglioramento osservato non è ascrivibile al caso. Tali risultati sembrano supportare l'ipotesi che l'esperienza immersiva, nella misura in cui trasforma contenuti astratti in rappresentazioni concrete, interattive e manipolabili, possa effettivamente favorire una più efficace interiorizzazione dei concetti scientifici.

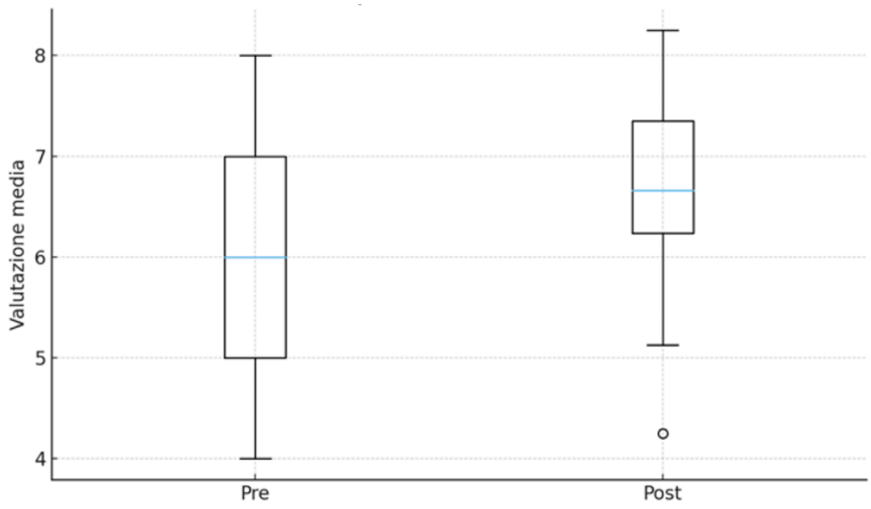


Grafico 20 - Voto di chimica del primo quadrimestre PRE sessione sperimentale, mediato tra pratica e teoria (scritto e orale), e la valutazione media ottenuta tra il voto pratico con il visore ed il voto scritto alla fine del test (POST).

Una delle principali criticità che caratterizzano l'insegnamento della chimica ed in generale le discipline STEM, è la distanza tra il piano teorico e quello fenomenico. Gli studenti faticano a costruire un'immagine mentale tridimensionale dei fenomeni atomici e molecolari, e tale difficoltà si traduce in una comprensione superficiale e mnemonica. In tale prospettiva, la realtà virtuale si configura non solo come ausilio visivo, ma come ambiente epistemico immersivo, capace di trasformare l'oggetto di apprendimento in esperienza concreta, situata e cognitivamente accessibile.

La forza della VR risieda nella possibilità di mettere in scena il sapere, restituendo al soggetto un ruolo di agente cognitivo che manipola, esplora e interroga la realtà simulata. Non si tratta, dunque, di sostituire la spiegazione con l'animazione, ma di aprire uno spazio intermedio tra percezione e concetto, in cui la conoscenza prende forma attraverso la corporeità dell'azione e la dinamica dell'interazione. In tal senso, l'incremento nei risultati non va interpretato come semplice effetto della novità strumentale, ma come possibile esito di una ristrutturazione profonda del modo in cui il contenuto disciplinare è stato vissuto e costruito.

Anche le osservazioni sistematiche e le verbalizzazioni raccolte nel *focus group* confermano questa interpretazione. Gli studenti hanno descritto l'ambiente VR come "utile per vedere davvero come funzionano le cose", "più facile per capire la chimica perché la puoi esplorare", "una materia che prima sembrava lontana, ma che ora riesco a capire meglio". Tali espressioni, pur nella loro spontaneità, testimoniano un cambiamento nella rappresentazione del sapere, che da oggetto esterno diventa spazio esperienziale accessibile, percorribile e mentalmente manipolabile.

L'esperienza immersiva, se progettata all'interno di una cornice didattica intenzionale e riflessiva, può effettivamente costituire un mediatore simbolico e sensoriale tra lo studente e la complessità disciplinare, generando effetti misurabili non solo sul piano motivazionale ed emozionale, ma anche su quello cognitivo e prestazionale. Tale risultato non solo rafforza la validità dell'ipotesi H3, ma suggerisce con forza che la realtà virtuale, nella scuola contemporanea, non debba essere intesa come semplice tecnologia di supporto, bensì *modus operandi* capace di riconfigurare le traiettorie dell'apprendimento.

Capitolo IV
Discussione

IV.1 Cornice interpretativa: tra immersione cognitiva, *agency* e regolazione affettiva

All'interno del disegno esplicativo adottato, l'interpretazione dei risultati empirici raccolti non può che articolarsi come un processo riflessivo multilivello, orientato a riannodare criticamente le dimensioni teoriche, metodologiche e analitiche che hanno strutturato l'impianto della presente ricerca. La natura profondamente complessa e interdipendente del fenomeno educativo oggetto di studio, ossia l'impatto dell'ambiente immersivo su motivazione, emozioni e apprendimento in una delle discipline STEM, impone un'analisi che si dispieghi secondo una logica integrativa, capace di coniugare evidenze quantitative, dati osservativi e narrazioni soggettive entro un *frame* sistemico.

Muovendo dalla cornice teorica delineata nel Capitolo I, emerge con forza il presupposto che l'ambiente di realtà virtuale non si configura come semplice interfaccia tecnologica, bensì come dispositivo didattico situato, dotato di una propria ontologia formativa, in grado di generare traiettorie di senso, attivazioni emotive e processi cognitivi profondamente individualizzati. La realtà virtuale, in qualità di emotional technologies, si configura come una vera e propria *experience providers*, capace di generare esperienze di apprendimento autentiche, multisensoriali e affettivamente connotate, in cui l'interazione attiva con l'ambiente digitale promuove processi di *agency* epistemica e un profondo coinvolgimento cognitivo ed emozionale dello studente (Muscatà et al., 2024).

In tale prospettiva, l'interpretazione dei dati raccolti tramite strumenti quali il questionario AMOS, il PANAS, le griglie osservative e il *focus group*, non mira a una validazione meccanicistica di ipotesi causali, bensì a costruire una lettura plausibile e densamente argomentata degli effetti educativi osservati, alla luce di un paradigma che riconosce l'esperienza

scolastica come processo mediato, trasformativo e situato. Si tratta, dunque, di interrogare i risultati non tanto come esiti isolati, ma come indizi fenomenologici di un mutamento possibile, pur nella parzialità e nei limiti strutturali di un *setting* sperimentale con gruppo unico, tempi brevi e variabilità interindividuale elevata.

La strutturazione teorica dell'indagine ha richiamato, in particolare, il concetto di motivazione come costrutto multidimensionale e plastico, intrecciato con fattori affettivi, metacognitivi e contestuali (De Beni et al., 2014; Pekrun, 2006). In parallelo, le emozioni scolastiche sono state interpretate non come semplici epifenomeni dell'esperienza didattica, ma come dispositivi regolatori capaci di modellare la partecipazione, l'autoefficacia percepita e la direzione degli obiettivi di apprendimento (Fredrickson, 2001; Pekrun, 2006). L'ambiente immersivo si inserisce così come *medium* intensivo capace di sollecitare, amplificare o riconfigurare tali dimensioni, in un equilibrio dinamico tra stimolazione sensoriale, ingaggio cognitivo e risonanza affettiva.

Inoltre, i dati sono stati letti tenendo conto del ruolo centrale assegnato, sin dal primo capitolo, alla figura del docente come mediatore emozionale e cognitivo, e non solo come facilitatore tecnico. La qualità osservata dell'intervento, la chiarezza progettuale, la presenza di momenti riflessivi o la loro assenza, divengono così categorie interpretative chiave, capaci di spiegare l'emersione o la latenza di stati motivazionali ed emotivi specifici.

Ne deriva che la presente sezione interpretativa non intende ridurre la complessità dei risultati a una serie di relazioni lineari tra variabili, bensì si propone di mappare le costellazioni relazionali tra indicatori, profili, comportamenti e vissuti. Il tutto entro una visione pedagogica che riconosce l'ambiente VR non come soluzione universale, ma come opportunità condizionata, la cui efficacia dipende dalla capacità del sistema educativo di incorporare intenzionalmente l'innovazione tecnologica in un disegno formativo riflessivo, inclusivo e regolato.

I risultati quantitativi emersi dal questionario AMOS, seppur non significativi sul piano statistico, mostrano una tendenza sistematica all'incremento dei punteggi post-intervento in tutte le sei dimensioni

rilevate, in particolare nella fiducia personale e nella teoria della personalità. Tale dato, ancorché da interpretarsi con prudenza per l'assenza di significatività formale, appare coerente con l'ipotesi secondo cui l'interazione immersiva, se progettata con intenzionalità didattica, può stimolare una maggiore apertura al cambiamento e una ristrutturazione positiva del sé percepito (cfr. par. I.3.3). L'analisi individuale delle variazioni (Δ) e la successiva clusterizzazione dei profili motivazionali ha ulteriormente rafforzato questa ipotesi, mostrando come circa un terzo degli studenti (Profilo C) abbia registrato incrementi diffusi in tutte le dimensioni motivazionali, suggerendo l'attivazione di un processo trasformativo coerente con la logica della plasticità cognitiva (cfr. par. I.3.2).

Sul versante affettivo, l'impiego del PANAS ha evidenziato una relativa stabilità del profilo emozionale aggregato, ma ha anche fatto emergere dinamiche evolutive differenziate, in particolare nella dimensione colpa, che ha registrato una variazione statisticamente significativa. Questo dato, apparentemente dissonante, è stato interpretato, coerentemente con la letteratura discussa al paragrafo I.3.2, come indice di una crescente consapevolezza metacognitiva e senso di responsabilità attivata da un ambiente che restituisce allo studente una posizione centrale e agentica nel processo di apprendimento. In altre parole, la colpa non è qui da intendersi come fallimento emotivo, bensì come presa di coscienza rispetto al proprio ruolo, all'impegno personale e al confronto con l'errore, configurandosi come emozione epistemica ad alto potenziale trasformativo.

Il confronto tra gruppi di rendimento ha ulteriormente rafforzato l'ipotesi che la VR agisca come amplificatore delle disposizioni preesistenti. Gli studenti ad alto rendimento hanno mostrato un incremento marcato di emozioni agentiche e positive (es. determinazione, orgoglio, vigilanza), mentre quelli a basso rendimento hanno manifestato un aumento di emozioni disforiche e autovalutative (es. preoccupazione, colpa, tensione). Questo dato, già anticipato nel paragrafo I.3.2.2 a proposito della necessità di regolazione affettiva intenzionale nei contesti immersivi, suggerisce che l'efficacia della VR non può essere considerata in termini assoluti, ma

richiede mediazioni pedagogiche differenziate, capaci di sostenere i soggetti più vulnerabili sul piano emozionale e motivazionale.

I dati osservativi, organizzati secondo le sei dimensioni progettuali (Contesto, Metodologia, Coinvolgimento, Inclusività, Realtà, Valutazione), hanno mostrato un profilo parzialmente polarizzato. Da un lato, punteggi elevati nelle dimensioni relative alla metodologia attiva e al coinvolgimento studentesco, coerenti con i presupposti della didattica esperienziale (cfr. par. I.2.3). Dall'altro, una certa fragilità nelle dimensioni dell'inclusività e della valutazione riflessiva, che appaiono ancora poco strutturate o episodiche. Tale sbilanciamento segnala un'importante tensione interna tra l'innovazione metodologica introdotta dalla tecnologia e l'assenza di un impianto valutativo e metacognitivo strutturato, capace di sostenere l'elaborazione affettiva e cognitiva dell'esperienza vissuta.

Infine, il *focus group* ha restituito una narrazione soggettiva densa, nella quale ricorrono riferimenti alla curiosità epistemica, alla novità dell'esperienza, ma anche al senso di fatica emotiva e alla percezione di inadeguatezza, soprattutto nelle fasi più complesse o meno guidate. Queste voci, lungi dal contraddire i dati quantitativi, li completano, rivelando il retroterra esperienziale su cui poggiano le variazioni misurate. In tal senso, l'integrazione tra dati numerici, osservativi e narrativi si configura come una logica interpretativa ad alta densità, nella quale ciascun dato acquista senso solo nel dialogo con gli altri livelli di analisi.

Per concludere, l'ambiente immersivo, così come progettato e osservato in questa ricerca, si è rivelato capace di attivare processi cognitivi e affettivi rilevanti, ma solo in presenza di chiarezza progettuale, accompagnamento riflessivo, mediazione emozionale. L'interpretazione che qui si propone intende dunque restituire la complessità di queste dinamiche, non come somma di risultati, ma come costruzione situata di significati educativi, in dialogo con il *frame* teorico tracciato nel Capitolo 1.

IV.2 Motivazione, *agency* e percezione del sé nello spazio immersivo (analisi AMOS)

I risultati derivanti dall'impiego del questionario AMOS, e in particolare dalla sezione "Questionario sulle Convinzioni" (De Beni et al., 2014), offrono un punto di accesso privilegiato alla comprensione delle disposizioni motivazionali attivate nel corso dell'intervento. Come già discusso nel Capitolo 1, la motivazione allo studio è stata concettualizzata come un costrutto dinamico e multidimensionale, frutto dell'interazione tra convinzioni di efficacia personale, obiettivi epistemici, rappresentazioni di sé e orizzonti affettivi. In questa cornice, il questionario AMOS non si limita a restituire una fotografia statica della motivazione, ma si configura come strumento diagnostico utile a mappare processi di trasformazione interna indotti da contesti educativi innovativi.

Dal confronto tra i valori medi pre e post-intervento, si osserva, su tutte e sei le dimensioni indagate, un incremento generalizzato dei punteggi. In particolare, la teoria della personalità (da 22.61 a 23.17), la fiducia nella propria personalità (da 8.39 a 8.70) e gli obiettivi di apprendimento (da 2.04 a 2.30) registrano le variazioni più marcate. Sebbene tali differenze non raggiungano la soglia di significatività statistica, esse risultano pedagogicamente rilevanti, in quanto segnalano una direzione di cambiamento coerente con gli obiettivi trasformativi dell'ambiente immersivo (cfr. par. I.2.5).

Il dato relativo alla teoria della personalità, in particolare, può essere interpretato alla luce della riflessione proposta nel paragrafo I.3.3, secondo cui la realtà virtuale, in quanto spazio epistemico intensivo, può agire sulla concezione di sé in termini di modificabilità e apertura all'apprendimento. L'esperienza immersiva, ponendo lo studente in una posizione di interlocutore attivo, tende a scardinare rappresentazioni entitarie del sé, favorendo l'emergere di un'idea di persona in divenire, capace di apprendere, modificarsi e riorientarsi rispetto al compito.

A questo quadro si aggiunge l'incremento nella fiducia nella propria personalità, che riflette un rafforzamento dell'autoefficacia socio-affettiva,

dimensione centrale nei contesti educativi caratterizzati da alta esposizione emozionale e cognitiva. Tale esito trova riscontro nelle osservazioni sistematiche, in cui è emersa una crescente disponibilità degli studenti a esporsi, cooperare e riflettere insieme, specie nella seconda metà del percorso, quando l'uso dei visori è divenuto più fluido e l'ambiente di apprendimento condiviso.

La dimensione relativa agli obiettivi di apprendimento, che distingue tra orientamento alla padronanza e alla prestazione, mostra un aumento di +0.26 (da 2.04 a 2.30), suggerendo un parziale spostamento del *focus* motivazionale verso configurazioni più orientate all'apprendimento significativo. In accordo con il modello di Pekrun (2006), tali trasformazioni possono essere lette come esiti indiretti dell'interazione tra emozioni epistemiche positive e spazi didattici ingaggianti. In questo senso, la VR sembra agire come catalizzatore di *agency*, stimolando negli studenti una tensione verso l'esplorazione, la sfida e la comprensione profonda, piuttosto che verso la mera performance valutativa.

Al di là dei valori aggregati, l'analisi delle variazioni individuali (Δ) ha rivelato un'elevata eterogeneità nei percorsi motivazionali. Alcuni studenti hanno manifestato incrementi su più dimensioni, mentre altri hanno mantenuto una traiettoria stabile o lievemente decrescente. Questa diversità, lontana dall'essere un'anomalia, conferma l'assunto teorico secondo cui la motivazione è un processo fortemente situato, interdipendente da variabili personali, esperienziali e relazionali. Le traiettorie motivazionali non sono lineari, ma seguono configurazioni reticolari, che richiedono letture idiografiche e multilivello (cfr. par. I.3.1.1).

La successiva clusterizzazione dei profili motivazionali, mediante algoritmo K-Means applicato alle Δ standardizzate, ha restituito tre profili distinti: profilo A (studenti con variazioni minime o stabili), profilo B (incremento selettivo su fiducia personale e obiettivi di apprendimento) e profilo C (incremento marcato e diffuso su tutte le dimensioni).

Il Profilo C, osservato in circa un terzo dei partecipanti, rappresenta l'esito più coerente con le ipotesi teoriche formulate a partire dal quadro normativo e scientifico (cfr. par. I.1.3 e I.2.2), che postulano l'effetto

trasformativo dell'innovazione metodologica solo quando questa è accompagnata da mediazioni intenzionali e attivazione di processi metacognitivi. Non a caso, gli studenti appartenenti a questo *cluster* risultano sovra-rappresentati tra coloro che hanno ottenuto valutazioni scolastiche più elevate, a conferma di una possibile sinergia tra rendimento, motivazione e *agency*.

Il confronto con le variabili anagrafiche e di contesto (genere, ripetenza, età) ha evidenziato ulteriori elementi di interesse. Gli studenti ripetenti tendono a concentrarsi nel Profilo A (bassa variazione), mentre quelli del Profilo C sono in prevalenza femmine, con *performance* scolastiche superiori. Questo dato, sebbene da interpretare con cautela, suggerisce che la risposta alla realtà immersiva non è uniforme, ma filtrata da fattori disposizionali e storie scolastiche pregresse, come discusso nel paragrafo I.3.5 in merito al rapporto tra vissuti emozionali, identità scolastica e *agency* personale.

Nel loro insieme, i dati AMOS restituiscono un quadro coerente con l'impostazione teorica della ricerca e l'ipotesi H1. La motivazione non è un prerequisito statico, ma un costrutto emergente e plasmabile, che si modifica in risposta all'ambiente, alle emozioni e alla struttura didattica. L'ambiente VR, in quanto spazio epistemico esperienziale, ha attivato processi differenziati di ridefinizione del sé, rafforzando, in molti casi, la fiducia personale, la percezione di efficacia e l'intenzionalità epistemica. Tuttavia, la presenza di profili stabili o debolmente reattivi richiama l'attenzione sul ruolo cruciale del docente come mediatore affettivo, motivazionale e metacognitivo, e sulla necessità di progettare ambienti immersivi pedagogicamente sostenibili.

IV.3 Regolazione affettiva, emozioni e vissuto immersivo (analisi PANAS)

L'analisi delle variazioni affettive emerse attraverso il questionario PANAS fornisce una chiave di lettura cruciale per comprendere la dimensione emotiva che ha accompagnato l'esperienza didattica immersiva.

In coerenza con quanto discusso nel paragrafo I.3, le emozioni scolastiche non vengono trattate come elementi accidentali o accessori, ma come dispositivi fondativi del comportamento cognitivo e motivazionale, capaci di influenzare in modo profondo l'attenzione, la memoria, la regolazione metacognitiva e la partecipazione attiva allo studio.

I dati raccolti mostrano un quadro affettivo articolato, caratterizzato da una polarizzazione emozionale in relazione ai livelli di rendimento scolastico e da una significativa attivazione del sentimento di colpa, l'unico indicatore a registrare una variazione statisticamente significativa nel confronto pre-post ($p = .032$). Tale risultato non può essere banalizzato come espressione di disagio o regressione emotiva, ma deve essere letto entro la cornice teorica che, nel paragrafo I.3.1, ha evidenziato la centralità delle emozioni autoriflessive nei processi di costruzione del sé epistemico. L'esperienza immersiva, restituendo allo studente un ruolo attivo nella costruzione del significato, sembra infatti aver attivato forme di consapevolezza metacognitiva, in cui il vissuto affettivo si intreccia alla percezione di responsabilità personale nei confronti del proprio apprendimento.

Le variazioni rilevate su altre emozioni, pur non significative dal punto di vista statistico, risultano comunque educativamente rilevanti, in particolare per ciò che concerne le emozioni a valenza positiva. Emozioni come determinazione, interesse, ispirazione e orgoglio hanno mostrato tendenze in aumento in diversi studenti, specialmente tra quelli con rendimento scolastico elevato. Tali emozioni, come discusso nella sezione I.3.2, si rivelano determinanti per l'attivazione dell'attenzione selettiva, la persistenza nei compiti cognitivamente impegnativi e la strutturazione di una memoria significativa. Esse generano, secondo la logica della *broaden-and-build theory*, un'espansione del repertorio cognitivo, promuovendo comportamenti orientati alla padronanza e all'esplorazione.

La differenziazione emozionale tra studenti con rendimento alto e basso trova piena coerenza con le analisi contenute nel paragrafo I.3.3, dove si sottolinea come il senso di *agency* e la percezione di sé come soggetto capace di agire intenzionalmente nel contesto immersivo siano condizioni

necessarie per la riorganizzazione affettiva positiva. Gli studenti con rendimento più alto hanno evidenziato un aumento netto di emozioni attivanti e auto-rinforzanti, a conferma di una presenza intenzionale nell'ambiente VR, intesa non solo come "essere lì", ma come essere cognitivamente e affettivamente connessi all'esperienza.

Di contro, gli studenti con rendimento più basso hanno mostrato aumenti marcati in emozioni quali preoccupazione, tensione, nervosismo e spavento. Tali stati emotivi, pur non indicativi di una disconnessione totale, segnalano la presenza di una fragilità emozionale che, come discusso nel paragrafo I.3.4, può essere amplificata dalla mancanza di mediazioni pedagogiche intenzionali e dalla natura altamente stimolante degli ambienti immersivi. Le tecnologie immersive, infatti, possono generare *engagement* solo in presenza di un clima educativo che garantisca sicurezza relazionale, accompagnamento riflessivo e riconoscimento soggettivo.

Anche le dinamiche osservate nella regolazione emotiva durante le diverse fasi del percorso confermano la letteratura teorica. Nella fase iniziale, l'emergere di emozioni positive quali entusiasmo, determinazione e interesse è coinciso con momenti didattici in cui la progettazione appariva particolarmente curata, la guida del docente presente e l'utilizzo del visore ben integrato. Nella fase finale, invece, si è assistito a una flessione emotiva, con un aumento delle emozioni disforiche, interpretabile anche come segnale di affaticamento cognitivo o saturazione percettiva, elementi già prefigurati nel paragrafo I.3.3, dove si avverte del rischio di un *engagement* solo superficialmente performativo se non adeguatamente supportato.

Non meno rilevante risulta, infine, l'elemento del senso di appartenenza, che nella sezione I.3.4 viene delineato come condizione cruciale per la qualità dell'esperienza educativa in VR. La mancanza di interazioni tra pari, l'impossibilità di vedere i compagni durante l'esperienza e la percezione di isolamento dichiarata da alcuni studenti nel *focus group* possono aver agito come fattori di disconnessione affettiva, soprattutto per quegli studenti già caratterizzati da profili motivazionali più fragili. In tal senso, l'incremento della colpa o della tensione potrebbe non derivare solo da difficoltà

cognitive, ma anche da un mancato radicamento sociale all'interno del contesto immersivo.

Infine, non meno importante, il momento di rilevazione t2(post) si avvicina al momento di valutazione didattica da parte della docente, e ciò può aver agito da catalizzatore di affettività negativa.

Nel complesso, l'analisi dei dati PANAS evidenzia che l'esperienza VR non ha avuto un effetto lineare sulle emozioni, ma ha prodotto una modulazione differenziale che rispecchia, e in parte amplifica, le differenze pregresse in termini di rendimento, *agency* e regolazione emozionale. Il dato più significativo non risiede dunque nell'entità numerica delle variazioni, quanto nella loro coerenza qualitativa con i presupposti teorici. Le emozioni, lungi dall'essere elementi collaterali, si rivelano strutture generative dell'apprendimento, in grado di sostenere o ostacolare l'elaborazione del sapere, a seconda del modo in cui vengono riconosciute, regolate e valorizzate.

Da ciò discende l'urgenza, già tematizzata nel Capitolo 1, di costruire ambienti educativi intenzionalmente affettivi, in cui la progettazione didattica sia capace di integrare il dato emotivo come parte integrante della formazione, e in cui il docente assuma un ruolo non solo tecnico, ma profondamente relazionale. L'efficacia dell'ambiente immersivo, infatti, non può essere separata dalla qualità delle mediazioni pedagogiche che ne accompagnano l'uso. Solo in presenza di un'interazione attenta tra dispositivo tecnologico e dispositivo educativo sarà possibile trasformare le emozioni suscitate dall'ambiente virtuale in risorse euristiche e metacognitive.

IV.4 Tra osservazione e narrazione: la tridimensionalità del comportamento didattico

Nel quadro metodologico della presente ricerca, l'integrazione tra osservazione sistematica e narrazione partecipata ha rappresentato un elemento cruciale per accedere a una comprensione tridimensionale dei processi formativi, non riducibile né all'evidenza numerica né alla mera

percezione soggettiva. Oltre alla natura quantitativa dei dati, l'adozione di una griglia di osservazione articolata su sei dimensioni (Contesto e Obiettivi della Lezione; Metodologia Didattica; Coinvolgimento degli Studenti; Inclusività e Personalizzazione; Collegamenti con il Mondo Reale; Valutazione della Lezione), unitamente alla conduzione del *focus group* semi-strutturato con nuclei di osservazione emersi (motivazione/fiducia, regolazione emotiva (focus su colpa), facilitazioni cognitive, coinvolgimento e *agency*, inclusività e personalizzazione, barriere e criticità) ha consentito di dischiudere livelli di significazione ulteriori, capaci di illuminare la struttura latente dell'esperienza educativa immersiva.

Le osservazioni sistematiche, condotte in ogni sessione e fondate su criteri codificati e ripetibili, hanno evidenziato un andamento progressivamente evolutivo nelle dimensioni della metodologia e del coinvolgimento. In particolare, a partire dalla terza sessione, è stato registrato un netto incremento nei comportamenti di partecipazione attiva, attenzione sostenuta e iniziativa autonoma da parte degli studenti. Tale andamento risulta pienamente coerente con le premesse teoriche delineate nel paragrafo I.2.3, dove l'ambiente immersivo viene descritto come spazio didattico capace di sollecitare *agency* cognitiva, grazie alla sua natura interattiva, multisensoriale e contestualizzata. Parallelamente, la qualità della metodologia osservata, fondata su un equilibrio tra guida docente, esplorazione autonoma e momenti di riflessione collettiva, ha contribuito a costruire un contesto favorevole all'attivazione motivazionale. L'ambiente VR, lungi dal sostituirsi alla mediazione didattica, si è dimostrato efficace nella misura in cui è stato intenzionalmente integrato in una cornice pedagogica orientata alla co-costruzione del significato.

Tuttavia, l'osservazione ha anche messo in luce zone di fragilità. Le dimensioni dell'inclusività e della valutazione riflessiva hanno mostrato livelli di attivazione discontinui o tendenzialmente bassi. Nonostante il dispositivo immersivo si presti a molteplici gradi di accessibilità e stimolazione, non è stata sempre garantita una personalizzazione sufficiente dell'esperienza, soprattutto per alcuni studenti con maggiori difficoltà nell'uso del visore o nel mantenimento dell'attenzione in contesti

a stimolazione elevata. Questo limite, già tematizzato nel paragrafo I.3.4, pone in evidenza la necessità di mediazioni pedagogiche specifiche per la gestione della vulnerabilità affettiva, la differenziazione dell'offerta e la costruzione di significati condivisi anche da parte di studenti meno autonomi o più fragili.

A rafforzare tale interpretazione, i dati raccolti nel *focus group* finale hanno fornito una controparte narrativa di grande densità esperienziale. Le narrazioni degli studenti hanno rivelato un vissuto ambivalente, nel quale si intrecciano emozioni di meraviglia, entusiasmo ed efficacia, ma anche disorientamento, affaticamento e frustrazione. Alcuni studenti hanno espresso una percezione aumentata di prossimità al sapere, dichiarando di "aver visto per la prima volta la struttura della materia" o di "essere entrati dentro la chimica", mentre altri hanno manifestato disagio legato alla gestione del visore o all'assenza di *feedback* immediato in alcune fasi.

In tal senso, l'ambiente VR ha agito come spazio bifronte: da un lato, catalizzatore di *agency*, curiosità e costruzione identitaria (cfr. par. I.3.3); dall'altro, potenziale amplificatore di ansie, esitazioni e sentimenti di isolamento, in particolare laddove non adeguatamente contenuto da strategie didattiche e affettive intenzionali. Questa ambivalenza esperienziale trova un ulteriore riscontro nei dati PANAS, dove l'aumento di emozioni attivanti in alcuni soggetti coesiste con un incremento di emozioni disforiche in altri. La traiettoria emozionale non lineare osservata nei dati quantitativi trova dunque un complemento descrittivo e fenomenologico nelle parole degli studenti, che restituiscono con precisione la stratificazione affettiva dell'esperienza.

Un ulteriore elemento emerso dal *focus group* riguarda la percezione del tempo e dello spazio didattico. Più voci hanno segnalato un riposizionamento cognitivo e affettivo rispetto alla lezione tradizionale, descrivendo l'ambiente immersivo come "spazio in cui la spiegazione è più intuitiva", "visualizzazione di concetti astratti" o "comprensione semplificata". Tali enunciati confermano quanto discusso nel paragrafo I.3.3 in merito alla potenzialità trasformativa delle tecnologie immersive nel ridefinire i *frame* di riferimento della didattica ordinaria. Tuttavia, a tale

trasformazione simbolica non è sempre corrisposta una struttura valutativa adeguata, e in molti casi è mancata una restituzione esplicita del significato dell'esperienza ai fini dell'apprendimento disciplinare.

Nel loro insieme, i dati osservativi e narrativi confermano la centralità di una progettazione didattica intenzionale, riflessiva e relazionale, capace di sostenere la complessità dell'ambiente immersivo e di guidare gli studenti non solo attraverso i contenuti, ma anche attraverso le emozioni, i dubbi e le risonanze simboliche che l'esperienza genera. La tridimensionalità del comportamento didattico, così come osservata nel contesto VR, non è riconducibile alla sola *performance* cognitiva, ma si manifesta come sintesi dinamica di attivazioni corporee, posture relazionali e configurazioni emotive. L'osservazione e la narrazione si rivelano, in questo senso, strumenti insostituibili per accedere al senso profondo dell'esperienza educativa, restituendo alla ricerca il volto complesso, situato e dialogico del processo di apprendimento.

IV.5 Verso un modello integrato: condizioni e limiti nei contesti VR-STEM

L'insieme dei dati raccolti e interpretati nel corso di questa indagine consente di delineare un primo modello interpretativo dei processi attivati dall'uso della realtà virtuale in contesti didattici STEM, in chiave sistemica e pedagogicamente fondata. La VR non si configura, in questa prospettiva, come tecnologia neutra o semplice strumento di mediazione, bensì come ambiente epistemico trasformativo, la cui efficacia dipende dalla densità intenzionale della progettazione, dalla qualità delle mediazioni affettive e metacognitive, e dalla capacità del sistema scolastico di riconfigurare i propri dispositivi formativi alla luce delle nuove *affordance* educative.

L'analisi integrata delle fonti empiriche ha evidenziato alcune convergenze significative. In primo luogo, le tendenze positive rilevate nel questionario AMOS, pur non significative sul piano statistico, indicano una mobilitazione motivazionale diffusa, con incrementi più marcati nella fiducia personale e nella teoria della personalità. Tali segnali, se interpretati

alla luce della cornice teorica proposta, suggeriscono che la VR può effettivamente agire come agente catalizzatore di *agency* epistemica, nella misura in cui il soggetto è posto in condizioni di agire intenzionalmente, riflettere su di sé e integrare emozione e cognizione in un processo di apprendimento situato.

Questa interpretazione trova ulteriore conferma nei dati PANAS, che hanno registrato un rafforzamento di alcune emozioni positive ad alta valenza cognitiva (determinazione, entusiasmo, interesse), in particolare nei soggetti con profili scolastici più solidi. Parallelamente, l'incremento della dimensione "colpa", interpretata come segnale di metacognizione affettiva e responsabilizzazione individuale, evidenzia la densità emotiva del contesto immersivo, che non può essere pensato come neutro, ma richiede al contrario strategie esplicite di regolazione emozionale.

A rafforzare tale quadro interpretativo intervengono le osservazioni didattiche e le narrazioni emerse nel *focus group*. Queste fonti qualitative hanno reso visibile una polarizzazione tra percorsi di crescita agentica e traiettorie di disconnessione affettiva, dimostrando come la tecnologia immersiva agisca da amplificatore delle disposizioni pregresse. Dove è presente una struttura motivazionale solida e un'identità scolastica riflessiva, la VR stimola coinvolgimento, esplorazione e curiosità epistemica. Dove, invece, sono presenti fragilità affettive o esperienze scolastiche negative, essa può indurre vissuti di spaesamento, tensione o inadeguatezza. Tali risultati evidenziano, pertanto, che l'effetto trasformativo della realtà virtuale non è generalizzabile, ma condizionato da una molteplicità di fattori. Tali fattori sono riconducibili alla qualità della progettazione didattica, in particolare l'allineamento tra obiettivi, metodologie, dispositivi e valutazione (cfr. I.2.3); alla presenza di una regia docente intenzionale, capace di mediare l'esperienza, valorizzare le emozioni epistemiche e garantire sicurezza relazionale (cfr. I.3.2); alla possibilità di elaborazione riflessiva, attraverso spazi di verbalizzazione, restituzione e rielaborazione metacognitiva (cfr. I.3.3), ed all'attenzione alla vulnerabilità, ovvero l'inclusione di strategie compensative per studenti a rischio di esclusione affettiva o cognitiva (cfr. 1.3.4).

Di conseguenza, si configura un modello integrato di intervento didattico in ambienti VR-STEM che non può prescindere da una visione sistemica. La tecnologia deve essere inscritta in un impianto progettuale che riconosce la complessità dell'apprendimento e ne assume la natura intrinsecamente affettiva, relazionale e situata. L'ambiente immersivo diviene efficace non per il suo grado di realismo, ma per la struttura semiotica e simbolica che lo sostiene, per la qualità delle interazioni che rende possibili, e per la capacità di generare *agency*, senso e appartenenza.

Accanto a queste condizioni, l'esperienza condotta ha anche messo in luce alcuni limiti strutturali che interrogano la sostenibilità della didattica VR. In primis la necessità di competenze specifiche per la gestione tecnica, la difficoltà di integrare strumenti valutativi coerenti e la discontinuità tra esperienza immersiva e sistema di significati scolastici tradizionali. Tali ostacoli, pur non invalidando la sperimentazione, ne delimitano il raggio d'azione, e chiamano in causa una riformulazione sistemica del curricolo e della cultura didattica.

In conclusione, la realtà virtuale, se accompagnata da un disegno formativo intenzionale, può contribuire a rinnovare profondamente il modo in cui lo studente si relaziona alla conoscenza, agli altri e a sé stesso. Tuttavia, essa non è di per sé garante di cambiamento. La sua efficacia si gioca interamente nella capacità della scuola di abitarla pedagogicamente, cioè di renderla ambiente educativo generativo, orientato alla costruzione condivisa del significato, alla cura delle emozioni e alla valorizzazione delle differenze. Solo in questa prospettiva, la VR può cessare di essere un'innovazione tecnologica episodica e diventare parte integrante dell'azione didattica quotidiana.

IV.6 Limiti dello studio: consapevolezza metodologica

Nella logica di una ricerca che ambisce a interrogare la complessità dell'agire educativo piuttosto che a ridurla a esiti deterministici, è fondamentale riconoscere, in maniera esplicita e argomentata, i limiti strutturali e contingenti che hanno accompagnato il presente lavoro. La

riflessione sui limiti non rappresenta, in questa sede, una dichiarazione di debolezza, bensì un esercizio di trasparenza epistemologica, volto a delimitare il perimetro entro cui i risultati ottenuti possono essere interpretati e generalizzati.

Un primo elemento di criticità riguarda la numerosità campionaria. Il lavoro è stato condotto su un singolo gruppo sperimentale, composto da ventiquattro studenti appartenenti ad una classe prima di scuola secondaria di secondo grado, senza la presenza di un gruppo di controllo. Questa scelta, giustificata dalla natura esplorativa dello studio e dalle condizioni organizzative della scuola, ha inevitabilmente limitato la possibilità di condurre analisi statistiche robuste e di attribuire significatività inferenziale ai cambiamenti osservati. L'assenza di un disegno controfattuale ha reso impossibile isolare l'effetto della variabile indipendente (esperienza VR) da altre possibili concause, interne o esterne al contesto educativo.

In secondo luogo, la durata temporale dell'intervento, circoscritta a un modulo di dieci lezioni, ha rappresentato un ulteriore vincolo interpretativo. Se da un lato questo ha permesso di focalizzare l'attenzione su un segmento didattico ben definito, dall'altro ha impedito di rilevare effetti di lungo periodo, sia sul piano motivazionale che su quello emozionale. Come noto, i processi trasformativi legati alla ristrutturazione delle credenze e all'internalizzazione delle emozioni richiedono tempi distesi, iterativi e contestualizzati, che con difficoltà possono essere osservati in un lasso temporale così circoscritto.

Un terzo aspetto riguarda la combinazione di strumenti di rilevazione eterogenei, tra cui questionari quantitativi standardizzati (AMOS e PANAS), osservazioni sistematiche e *focus group*. Pur avendo adottato un disegno *mixed-methods* coerente, la triangolazione tra i diversi livelli di analisi è stata resa complessa dalla diversa granularità e natura epistemica dei dati raccolti. La compresenza di scale Likert, codifiche osservative e narrazioni discorsive ha richiesto operazioni interpretative complesse, non sempre perfettamente armonizzabili sul piano dell'analisi integrata.

Inoltre, non va trascurato il possibile effetto di reattività degli studenti rispetto all'uso del visore VR. L'elemento di novità e l'impatto sensoriale dell'ambiente immersivo potrebbero aver generato forme di entusiasmo iniziale, difficilmente distinguibili da una motivazione autenticamente epistemica. In assenza di un *follow-up* a medio termine, non è possibile stabilire se l'attivazione osservata rappresenti un cambiamento profondo e duraturo o, al contrario, un effetto temporaneo legato all'eccezionalità dello strumento tecnologico.

Un ulteriore limite, non secondario, concerne la generalizzabilità dei risultati. Il contesto specifico in cui si è svolta la sperimentazione, una sola classe, un'unica disciplina (chimica), un solo docente, impone cautela nell'estendere le conclusioni ad altri ordini di scuola, ad altre aree disciplinari o a *setting* didattici differenti. Ogni ambiente educativo possiede caratteristiche irripetibili sul piano relazionale, culturale e organizzativo, e ciò rende la replicabilità non automatica.

Infine, sul piano teorico, si segnala come alcune categorie analitiche, in particolare quelle relative alla dimensione emozionale, risultino ancora parzialmente instabili sul piano operativo, nonostante i tentativi di strutturazione attraverso strumenti validati. La complessità delle emozioni in ambito educativo, la loro natura situata e stratificata, rende difficile una loro piena cattura attraverso questionari *self-report*, che per quanto raffinati, rischiano di semplificare l'esperienza vissuta dallo studente in nome della misurabilità.

Nonostante la declarazione di tali limiti, si ritiene che lo studio offra un contributo originale alla comprensione delle potenzialità e delle criticità dell'uso della realtà virtuale nelle discipline STEM, ponendo le basi per sviluppi futuri più articolati, sia sul piano empirico che su quello teorico. Come ogni ricerca situata, essa non pretende di offrire verità generalizzabili, ma piuttosto di produrre conoscenza significativa a partire dall'intreccio tra dati, teoria e contesto.

IV.7 Ipotesi di sviluppo: verso un'estensione sensoriale e neurodidattica della ricerca

Alla luce delle riflessioni condotte, risulta evidente come l'esperienza sperimentale qui documentata possa costituire il punto di partenza per una progettualità più ampia e articolata, capace di indagare con maggiore profondità la dimensione emotiva e sensoriale dell'apprendimento mediato da ambienti virtuali. Se l'attuale lavoro ha adottato strumenti prevalentemente *self-report* o osservativi per rilevare gli stati motivazionali ed emozionali degli studenti, una possibile evoluzione del disegno di ricerca potrebbe orientarsi verso l'integrazione di tecnologie di monitoraggio fisiologico, in grado di restituire indicatori oggettivi e in tempo reale dei vissuti esperienziali.

In particolare, si ipotizza l'utilizzo di sensori per la rilevazione del GSR (*galvanic skin response*) e della frequenza cardiaca (HR), dispositivi già impiegati in ambito neuroeducativo per misurare l'*arousal* emotivo e la risposta autonoma a stimoli cognitivi ed emozionali. Tali dati, se raccolti in concomitanza con le attività in VR, potrebbero contribuire a una comprensione più fine dell'impatto della realtà immersiva sull'attivazione affettiva degli studenti, arricchendo la triangolazione tra componenti soggettive, osservabili e fisiologiche. Una prova di quanto sinora proposto è stata condotta su una studentessa (Immagine n.15 in Allegati) attraverso dispositivi della linea NeuLog e del relativo software proprietario. Alla studentessa, finita la propria sessione di studio ed esercitazione, è stato chiesto di eseguire una seconda esercitazione dopo averle sistemato nel dito indice e medio i sensori per il rilevamento del segnale GSR e nell'anulare il sensore per la rilevazione del battito cardiaco. Lo scopo di tale attività è stato semplicemente valutare la fattibilità della proposta di sviluppo, registrando per qualche minuto l'andamento del segnale GSR e HR della studentesssa.

A ciò si potrebbe affiancare il monitoraggio di parametri elettroencefalografici (EEG) attraverso strumenti non invasivi e di dimensioni contenute, come i caschetti della linea NeuroSky o dispositivi analoghi, già sperimentati in contesti educativi per l'analisi dell'attenzione,

del carico cognitivo e degli stati di *engagement*. L'integrazione di tali tecnologie, se condotta con rigore metodologico e consapevolezza etica, consentirebbe di rilevare *pattern* neurofisiologici associati a specifici momenti dell'esperienza immersiva, identificando, ad esempio, picchi attentivi, stati di frustrazione, o condizioni di *flow*.

L'adozione di questi strumenti aprirebbe la strada a un nuovo paradigma di ricerca didattica, in cui l'apprendimento non è più osservato solo dal punto di vista dichiarativo o comportamentale, ma viene analizzato come fenomeno incarnato, multisensoriale e neurologicamente tracciabile. In tal senso, la VR, da ambiente esperienziale, si trasformerebbe anche in ambiente di rilevazione, offrendo una piattaforma integrata per la raccolta simultanea di dati quantitativi, qualitativi e fisiologici.

Naturalmente, tale ipotesi di sviluppo richiederebbe un investimento nella definizione di protocolli sperimentali adatti all'ambiente scolastico, nella formazione dei docenti all'uso dei dispositivi e nella creazione di una cornice etico-pedagogica chiara, capace di garantire la tutela della *privacy*, la consapevolezza degli studenti e la sostenibilità operativa dell'intervento. Tuttavia, proprio questa complessità potrebbe rappresentare il valore aggiunto di un disegno di ricerca capace di coniugare innovazione tecnologica, rigore metodologico e rilevanza educativa.

In definitiva, l'integrazione di strumenti di *biofeedback* e neuro-monitoraggio nella ricerca educativa sull'uso della VR non va intesa come deriva tecnicistica, ma come opportunità per espandere lo sguardo pedagogico verso le dimensioni meno visibili e meno verbalizzabili dell'esperienza di apprendimento. È proprio in questo spazio, tra emozione, corpo e tecnologia, che si collocano le prossime sfide della didattica immersiva.

Conclusioni

Il presente lavoro di ricerca ha inteso esplorare in modo sistemico e multidimensionale il potenziale educativo delle tecnologie immersive applicate alla didattica di una delle discipline STEM nella scuola secondaria di secondo grado, ponendo al centro dell'indagine il vissuto motivazionale, emozionale e partecipativo degli studenti. L'intervento ha assunto la forma di un percorso didattico sperimentale, articolato in dieci incontri su contenuti di chimica, durante i quali una classe di ventiquattro studenti è stata coinvolta in attività formative mediate da visori di realtà virtuale, con la finalità di osservare e analizzare eventuali variazioni nelle disposizioni soggettive all'apprendimento.

A monte della ricerca si colloca una cornice teorica che intreccia i più recenti contributi nell'ambito della didattica immersiva, della psicologia motivazionale, della neuroeducazione e della pedagogia delle emozioni. La motivazione all'apprendimento, la qualità dell'*engagement*, la regolazione affettiva e il senso di *agency* sono stati assunti come indicatori fondamentali per valutare la qualità dell'esperienza formativa in contesto STEM, in linea con le indicazioni delle Linee Guida del Ministero dell'Istruzione e del Merito (2023) e con le Raccomandazioni europee sulle competenze chiave per l'apprendimento permanente (2018).

Gli obiettivi iniziali della ricerca, come delineato nel Capitolo II, si articolavano attorno a tre assi principali: (1) verificare se e in che misura l'introduzione di un ambiente di apprendimento immersivo potesse incidere sulle rappresentazioni motivazionali degli studenti; (2) analizzare le modulazioni emozionali indotte dall'esperienza in VR e il loro possibile impatto sull'attivazione cognitiva e sull'*engagement* didattico; (3) valutare le *performance* formative degli studenti. A partire da tali obiettivi sono state formulate ipotesi di lavoro che prevedevano, da un lato, un incremento nella percezione di autoefficacia, fiducia e orientamento alla padronanza, e dall'altro, una maggiore attivazione emozionale positiva nei momenti centrali dell'esperienza immersiva.

Per rispondere a tali interrogativi, è stato adottato un disegno di ricerca di tipo quasi-sperimentale a gruppo unico, articolato secondo una logica *mixed-methods* di tipo esplicativo sequenziale. Il disegno ha integrato strumenti quantitativi (questionari AMOS e PANAS), rilevazioni osservative sistematiche e *focus group* a fine percorso, con l'obiettivo di cogliere le dinamiche soggettive e interattive dell'esperienza in una prospettiva tridimensionale, rispettosa della complessità educativa. I dati raccolti sono stati analizzati secondo procedure statistiche descrittive e inferenziali, cui si sono affiancate analisi qualitative tematiche e interpretazioni integrative.

I risultati emersi, analizzati nel Capitolo III e interpretati nel Capitolo IV, offrono un quadro articolato, in cui convergono tendenze coerenti ma non prive di ambivalenze. Sul versante motivazionale, si osserva un *trend* di miglioramento in tutte le sei dimensioni del questionario AMOS, con particolare rilievo nella dimensione relativa alla teoria della personalità, che ha mostrato l'incremento medio più significativo (+0.57). Questo dato suggerisce una maggiore disponibilità degli studenti a concepire il sé come entità modificabile, in linea con una visione incrementale dell'intelligenza e delle competenze, già discussa in letteratura come fattore protettivo nei contesti ad alta complessità cognitiva. Anche la fiducia personale e la percezione delle abilità di studio mostrano variazioni positive, sebbene non statisticamente significative, indicando un possibile rafforzamento della *self-perception* a seguito dell'esperienza immersiva.

Sul piano emozionale, l'analisi del questionario PANAS ha restituito un quadro più ambivalente: accanto all'aumento di *item* emozionali positivi come "orgoglioso", "determinato", "vigile", "interessato" e "ispirato", si osserva un incremento significativo nella voce "colpevole" ($p = .032$). Da un lato, l'emergere di emozioni attivanti suggerisce una forma di coinvolgimento autentico, in cui lo studente si sente chiamato a confrontarsi con il compito in modo responsabile, dall'altro, l'aumento del senso di colpa può riflettere l'emersione di una maggiore consapevolezza rispetto al proprio agire, possibile esito della natura fortemente immersiva dell'ambiente VR, che colloca lo studente al centro dell'azione.

Le osservazioni sistematiche hanno confermato tale ambivalenza, documentando un progressivo aumento del coinvolgimento attivo e della partecipazione intenzionale nel corso delle lezioni, ma anche momenti di disorientamento e frustrazione, specialmente nelle prime fasi dell'utilizzo del visore. La lettura congiunta dei dati ha quindi suggerito che la realtà virtuale, lungi dal produrre effetti univoci, agisce come ambiente trasformativo situato, in grado di sollecitare disposizioni affettive e motivazionali complesse, che devono essere interpretate all'interno di una cornice intenzionale e didatticamente orientata.

La complessità dei risultati ottenuti trova piena legittimazione all'interno della cornice teorica adottata, che ha da subito messo in discussione ogni visione lineare del processo di insegnamento-apprendimento. Come discusso nel Capitolo I, la motivazione non si configura come un attributo statico dell'individuo, ma come esito dinamico di un'interazione situata tra soggetto, compito e ambiente. La realtà immersiva, per sua natura, agisce su tutti e tre questi poli, ridefinisce il rapporto spaziale e corporeo tra studente e contenuto, trasforma la struttura dell'azione didattica e sollecita una riflessione identitaria rendendo visibile la relazione tra ciò che si apprende e ciò che si è.

In tale prospettiva, il miglioramento osservato nella dimensione della modificabilità del sé può essere letto come effetto di una ristrutturazione delle credenze implicite sull'apprendimento, favorita da un'esperienza che pone lo studente "dentro" il sapere, non solo in senso metaforico ma propriamente sensoriale. Il fatto che lo studente agisca all'interno dello spazio virtuale, manipolando oggetti, simulando reazioni, esplorando strutture atomiche, modifica il rapporto epistemico con il contenuto, rafforzando la percezione di essere agente del proprio apprendimento.

Similmente, l'emergere di emozioni come l'orgoglio, la determinazione e l'interesse, rilevate nel questionario PANAS, può essere interpretato come indicatore di una forma di *engagement* profondo, che non si limita alla dimensione attentiva, ma coinvolge la sfera identitaria e relazionale. Le emozioni positive non sono semplici epifenomeni del processo educativo, ma elementi costitutivi della disponibilità cognitiva, poiché ampliano il

campo percettivo, facilitano la memoria di lavoro e predispongono alla regolazione metacognitiva.

Particolarmente rilevante appare, da questo punto di vista, la convergenza tra i dati quantitativi e le evidenze qualitative emerse attraverso l'osservazione sistematica e il *focus group*. La triangolazione dei dati ha consentito di superare la bidimensionalità tipica dei questionari standardizzati, restituendo una rappresentazione più densa e sfaccettata dei vissuti degli studenti. Le narrazioni raccolte nel *focus group*, ad esempio, hanno permesso di comprendere che l'emozione del "sentirsi colpevole", rilevata in termini numerici, non va interpretata come esito negativo, ma come segnale di un processo di assunzione di responsabilità, maturato in un contesto in cui l'errore non è più punizione ma occasione di apprendimento.

Questo dato trova ulteriore conferma nei *verbatim* in cui gli studenti descrivono l'ambiente VR come un "luogo in cui sbagliare non fa paura", "in cui si può riprovare finché non riesce", "in cui la chimica è finalmente visibile". Tali formulazioni non sono semplici opinioni, ma indizi linguistici di una ridefinizione del ruolo dello studente, da esecutore di procedure a costruttore di significati. In questa chiave, l'esperienza immersiva appare come spazio simbolico in cui il sapere disciplinare si corporeizza, si sperimenta, si negozia.

Il disegno di ricerca adottato, basato su una strategia esplicativa a gruppo unico, ha offerto uno strumento metodologico adatto a cogliere tale complessità, pur nei limiti intrinseci già discussi. La combinazione tra misure pre-post, osservazioni sistematiche e dati qualitativi ha permesso non solo di descrivere gli effetti dell'intervento, ma anche di attribuire loro significato educativo, secondo una logica interpretativa che riconosce valore alla coerenza interna più che alla significatività statistica. La scelta di integrare fonti eterogenee ha reso possibile una lettura tridimensionale dei dati, in cui le discrepanze non sono anomalie, ma elementi generativi di nuove ipotesi e riflessioni.

Sul piano pedagogico, i risultati ottenuti suggeriscono che l'impiego di ambienti immersivi può rappresentare un'opportunità concreta per riconfigurare le pratiche didattiche nelle STEM, rendendole più motivanti e

centrate sullo studente. Tuttavia, ciò non accade in automatico, il rischio di una spettacolarizzazione dell'apprendimento è reale se l'uso del visore non è accompagnato da una solida progettazione didattica e da una regia pedagogica capace di trasformare l'esperienza in sapere. L'ambiente VR, in sé, non insegna nulla, è la cornice intenzionale entro cui esso è collocato a determinarne il valore formativo.

Da questo punto di vista, il ruolo del docente si riconferma centrale, non come semplice facilitatore tecnico, ma come mediatore emozionale, capace di leggere, interpretare e accompagnare le traiettorie affettive che si articolano all'interno degli ambienti digitali. La VR, proprio per la sua forza immersiva, amplifica le emozioni, le rende visibili, le esternalizza. È compito del docente riconvertirle in apprendimento, evitando che si disperdano in un eccesso di stimolazione sensoriale priva di significato.

Il lavoro svolto offre dunque un contributo originale alla riflessione su come le tecnologie immersive possano essere integrate in modo significativo nei curricoli scientifici, non tanto per semplificare la complessità disciplinare, quanto per renderla esperibile, manipolabile, interrogabile. La dimensione immersiva non sostituisce la fatica cognitiva, ma la rende abitabile, la incarna e le può dare forma. Ed è proprio in questa integrazione tra corpo, emozione e concetto che si gioca la sfida della didattica STEM del futuro.

Le tecnologie immersive, per quanto promettenti, non sono neutre, esse, infatti, veicolano visioni del mondo, modelli di relazione, strutture cognitive. Il loro ingresso nella scuola non può avvenire senza una riflessione accurata sulle implicazioni epistemologiche, affettive ed etiche che esse comportano. È proprio in questo spazio di riflessione che si colloca il presente lavoro, la cui ambizione non è stata tanto quella di "misurare" gli effetti della VR, quanto di comprendere come essa modifichi le condizioni di possibilità dell'apprendimento.

Dal punto di vista teorico, il lavoro ha mostrato l'utilità di pensare la motivazione, l'*engagement* e l'emozione non come dimensioni isolate, ma come elementi interdipendenti che si co-costruiscono all'interno di un ambiente didattico intenzionalmente progettato. L'introduzione della VR

non è un'innovazione in sé, ma diventa tale quando è collocata in una cornice pedagogica che ne valorizza le specificità. In questo senso, il contributo più rilevante di questo lavoro non risiede tanto nei singoli dati rilevati, quanto nel modello teorico-metodologico che ne ha guidato la costruzione. Un modello che integra rigore analitico e profondità interpretativa, apertura al dato e centralità della soggettività.

A livello metodologico, la ricerca ha sperimentato un disegno che, pur nella sua semplicità strutturale, ha dimostrato una notevole capacità di restituire la complessità dei fenomeni educativi. L'uso congiunto di strumenti quantitativi e qualitativi, l'analisi pre-post su più dimensioni, l'attenzione ai vissuti degli studenti e alle dinamiche del contesto, hanno permesso di costruire una narrazione empiricamente fondata ma teoricamente densa. È proprio in questa capacità di tenere insieme dati e significati, numeri e parole, misurazione e interpretazione, che si colloca il valore aggiunto di un approccio pedagogico alla ricerca educativa.

Dal punto di vista formativo, il percorso realizzato ha avuto ricadute significative anche per il contesto scolastico coinvolto. Gli studenti hanno potuto vivere un'esperienza didattica radicalmente diversa da quella consueta, in cui il sapere scientifico non è stato semplicemente "insegnato", ma è stato "vissuto", esplorato, interrogato in prima persona. I docenti, a loro volta, sono stati coinvolti in un processo di riflessione e rielaborazione delle proprie pratiche, che ha messo in discussione alcune *routine* operative e ha aperto nuovi orizzonti metodologici. In questo senso, la ricerca ha agito anche come dispositivo trasformativo, capace di generare cambiamento a partire dalla messa in discussione degli assunti impliciti dell'agire educativo.

Sul piano etico, la conduzione della ricerca ha imposto un costante esercizio di responsabilità nei confronti degli studenti, chiamati a esporsi non solo cognitivamente, ma anche emotivamente, in un ambiente che amplifica percezioni, reazioni e vissuti. La scelta di adottare strumenti rispettosi della soggettività, di prevedere momenti di riflessione collettiva, di valorizzare la voce degli studenti attraverso il *focus group*, è stata guidata da una concezione della ricerca come pratica educativa prima ancora che

come procedura tecnica. Una ricerca che non si limita a raccogliere dati, ma che accompagna, ascolta e restituisce significato.

Alla luce di quanto emerso, è possibile affermare che l'esperienza condotta rappresenta un prototipo metodologico e pedagogico da cui possono derivare sviluppi futuri. In particolare, come discusso nel Capitolo IV, l'ipotesi di integrare l'uso della VR con dispositivi di rilevazione del *biofeedback* (GSR, HR) e segnali EEG attraverso tecnologie leggere e non invasive (come NeuroSky) apre scenari di grande interesse. Tali sviluppi, se sostenuti da un impianto etico e da una progettualità pedagogica solida, potrebbero arricchire in modo decisivo la comprensione dei meccanismi neurofisiologici sottesi all'apprendimento immersivo.

In conclusione, il presente lavoro non pretende di offrire risposte definitive né modelli generalizzabili, ma intende contribuire alla costruzione di una cornice epistemica e operativa per la ricerca pedagogica sull'uso delle tecnologie immersive nella didattica STEM. In un contesto educativo in continua trasformazione, segnato da tensioni tra innovazione e riproduzione, tra standardizzazione e personalizzazione, tra emozione e cognizione, la VR si configura come uno spazio potenziale di riconfigurazione didattica. Tale potenziale può esprimersi solo a condizione che venga assunto con consapevolezza critica, progettato con intenzionalità formativa e accompagnato da una lettura profonda dei suoi effetti educativi.

In questo senso, la tecnologia non è il fine, ma il mezzo. L'obiettivo resta quello, eminentemente pedagogico, di costruire ambienti di apprendimento autentici, che sappiano sostenere la curiosità, accogliere l'errore, valorizzare la pluralità dei linguaggi e potenziare la soggettività di ciascuno. Ed è in questa direzione che il presente lavoro, pur con i suoi limiti, intende orientare il proprio contributo.

Bibliografia

Antonelli, D., Christopoulos, A., Laakso, M. J., Dagienė, V., Juškevičienė, A., Masiulionytė-Dagienė, V., Mądziel, M., Stadnicka, D., & Stylios, C. (2023). A virtual reality laboratory for blended learning education: design, implementation and evaluation. *Education Sciences*, 13(5), 528. DOI: https://doi.org/10.3390/educsci13050528

Ardianti, S., Sulisworo, D., Pramudya, Y., & Raharjo, W. (2020). The impact of the use of STEM education approach on the blended learning to improve student's critical thinking skills. *Universal Journal of Educational Research*, 8(3), 24-32. DOI: 10.13189/ujer.2020.081503

Arslan, E., E., Aksahin, M., F., Yilmaz, M., & Ilgın, H., E. (2024). Towards Emotionally Intelligent Virtual Environments: Classifying Emotions through a Biosignal-Based Approach. *Applied Sciences*, 14, 8769. DOI: https://doi.org/10.3390/app14198769

Bartolucci, M., Batini, F., & Scierri, I. D. M. (2018). Promoting educational success and countering early school leaving. Effects of authentic learning tasks in upper secondary education. *RicercAzione*, 10(2), 209-227. DOI: 10.32076/RA10213

Bertheaux, C., Zimmermann, E., Gazel, M., Delanoy, J., Raimbaud, P., & Lavoué, G. (2024). Effect of material properties on emotion: a virtual reality study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 1301891. DOI: 10.3389/fnhum.2023.1301891

Bilotti, U., Campitiello, L., Todino, M., D., & Sibilio, M. (2023). Emulation and understanding the emotion according to Generative Artificial Intelligence: Case study of emotional component extracted from visual artworks. *Journal of Inclusive Methodology and Technology in Learning and Teaching*, 3(4), 1-9.

Bogusevschi, D., Muntean, C., & Muntean, G. M. (2020). Teaching and learning physics using 3D virtual learning environment: A case study of combined virtual reality and virtual laboratory in secondary school. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 39(1), 5-18. DOI: https://doi.org/10.70725/297454nsjryb

Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. Qualitative Research in Psychology, 3(2), 77–101. DOI: https://doi.org/10.1191/1478088706qp0630a

Buckey, K., N., (2021). Technical Programs. In Staat, D. W. (a cura di), *Virtual reality in higher education: instruction for the digital age*. (pp. 67-78). Rowman & Littlefield.

Campos, E., Hidrogo, I., & Zavala, G. (2022). Impact of virtual reality use on the teaching and learning of vectors. Frontiers in Education, 7, 965640. DOI: doi: 10.3389/feduc.2022.965640

Carter, N., Bryant-Lukosius, D., DiCenso, A., Blythe, J., & Neville, A. J. (2014). The use of triangulation in qualitative research. Oncology Nursing Forum, 41(5), 545–547. DOI: https://doi.org/10.1188/14.ONF.545-547

Cedefop, & ReferNet. (2025). STEM Agenda 2030: Belgium-FL. In Cedefop, & ReferNet. (2025). Timeline of VET policies in Europe. https://www.cedefop.europa.eu/en/tools/timeline-vet-policies-europe/search/43768 [10/09/2025]

Çeken, B., & Taskin, N. (2022). Multimedia learning principles in different learning environments: a systematic review. *Smart Learning Environments*, 9(1). DOI: https://doi.org/10.1186/s40561-022-00200-2

Cipollone, E. (2021). Apprendere con il cuore: come le emozioni influenzano l'apprendimento. GAIA srl-Edizioni Universitarie Romane.

Clark, V. L. P., & Ivankova, N. V. (2015). *Mixed methods research: A guide to the field* (Vol. 3). Sage publications. DOI: https://doi.org/10.4135/9781483398341

Çoban, M., Akçay, N., O., & Çelik, İ. (2022). Using virtual reality technologies in STEM education: ICT pre-service teachers' perceptions. *Knowledge Management & E-Learning*, 14(3), 269-285. DOI: https://doi.org/10.34105/j.kmel.2022.14.015

Consiglio d'Europa (2018). Raccomandazione relativa alle competenze chiave per l'apprendimento permanente. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018H0604(01) [25/09/2024]

Couso, D., Simarro, C., & López-Simó, V. (2020). EducaciónSTEM en y para un mundo digital: el papel de lasherramientas digitales en el desempeño de prácticas científicas, ingenieriles y matemáticas. *Revista de Educación a Distancia* (RED), 62(20), 1-29. DOI: https://doi.org/10.6018/red.410011

Cromley, J. G., Chen, R., & Lawrence, L. (2023). Meta-analysis of STEM learning using virtual reality: Benefits across the board. *Journal of Science Education and Technology*, 32(3), 355-364. DOI: https://doi.org/10.1007/s10956-023-10032-5

Danmali, S., S., Onansanya, S., A., Atanda, F., A., & Abdullahi, A. (2024). Application of Virtual Reality in STEM Education for Enhancing Immersive Learning and Performance of At-Risk Secondary School Students. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, 8(3s), 3971-3984. DOI: https://dx.doi.org/10.47772/IJRISS.2024.803288S

De Beni, R., Zamperlin, C., Meneghetti, C., Cornoldi, C., Fabris, M., Tona, G. D. M., & Moè, A. (2014). *Test AMOS-Abilità e motivazione allo studio: prove di valutazione e orientamento per la scuola secondaria di secondo grado e l'università: Nuova edizione*. Edizioni Centro Studi Erickson.

Deng, L., Poole, M., S. (2010). Affect in web interfaces: a study of the impacts of web page visual complexity and order. *MIS Quaterly*, 34(4): 711-730. Stable URL: https://www.jstor.org/stable/25750702

Dewey, J. (2014). Esperienza e educazione (F. Cappa, a cura di; E. Codignola, Trad.). Raffaello Cortina Editore. (Originale pubblicato nel 1938)

Di Fabio, A., & Svicher, A. (2025). Proprietà Psicometriche del Positive and Negative Affect in Studies: PANASS Scales. *Edizioni Centro Studi Erickson, Trento, 2025 — Counseling*, 18(1), 90-99. DOI: 10.14605/CS1812507

Drigas, A., Mitsea, E., & Skianis, C. (2023). Effects of digital games training on hormonal responses and brain plasticity. *Research Society and Development*, 12, 1-16. DOI: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v12i2.39568

Drigas, A., Papanastasiou, G., & Skianis, C. (2023). The School of the Future. The Role of Digital Technologies, Metacognition and Emotional Intelligence. *iJET* – Vol. 18, No. 09, 65-85. DOI: https://doi.org/10.3991/ijet.v18i09.38133

Dubovi, I. (2022). Cognitive and emotional engagement while learning with VR: The perspective of multimodal methodology. *Computers & Education*, 183, 104495. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104495

Dyson, B., Baek, S., Howley, D., Lee, Y., Fowler, J. (2024). Students' Perspectives of Social and Emotional Learning in a High School Physical Education Program. *Journal of Teaching in Physical Education*, 43, 549-556. DOI: https://doi.org/10.1123/jtpe.2023-0090

Dzulkifli, M., A., & Mustafar, M., F. (2013). The influence of colour on memory performance: a review. *Malays J Med Sci*, 20(2), 3-9.

Ekman, P., Sorenson, R., Friesen, W.V. (1969). Pan-cultural elements in facial display of emotion. *Science,* (164), 86-88.

Elías, M., Pérez, J., Cassot, MdR, Carrasco, E. A., Tomljenovic, M., & Zúñiga, E. A. (2022). Development of digital and science, technology, engineering, and mathematics skills in chemistry teacher training. *Frontiers in Education*, 7:932609. DOI: 10.3389/feduc.2022.932609

Eliot, J.A.R., Hirumi, A. (2019). Emotion theory in education research practice: an interdisciplinary critical literature review. *Educational Technology Research and Development,* 67(5), 1065-1084. DOI: https://doi.org/10.1007/s11423-018-09642-3

Elme, L., Jørgensen, M. L., Dandanell, G., Mottelson, A., & Makransky, G. (2022). Immersive virtual reality in STEM: is IVR an effective learning medium and does adding self-explanation after a lesson improve learning outcomes?. *Educational technology research and development*, 70(5), 1601-1626. DOI: https://doi.org/10.1007/s11423-022-10139-3

Fajardo Tovar, D., Jonker, V., & Wolfgang, H. (2020). Virtual Reality and Augmented Reality in Education: A review. *Strengthen your education with Educate-it*, 1-28. Universiteit Utrecht. Online: https://www.uu.nl/sites/default/files/20200204_rapportage-literatuurstudie-AR-VR.pdf

Flegr, S., Kuhn, J., & Scheiter, K. (2023). How to foster STEM learning during Covid-19 remote schooling: Combining virtual and video experiments. *Learning and Instruction*, 86, 101778. DOI: https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2023.101778

Fredrickson, B. L. (2001). The role of positive emotions in positive psychology: The broaden-and-build theory of positive emotions. *American Psychologist*, 56(3), 218–226. DOI: https://doi.org/10.1037/0003-066X.56.3.218

Fredrickson, B., L. (2004). The broaden–and–build theory of positive emotions. Philosophical transactions of the royal society of London. Series B: Biological Sciences, 359(1449), 1367-1377. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2004.1512

Frenzel, A.C., Daniels, L., Burić, I. (2021). Teacher emotions in the classroom and their implications for students. *Educational Psychologist*, 56(4), 250-264. DOI: https://doi.org/10.1080/00461520.2021.1985501

Geroimenko, V. (2020). *Augmented reality in education. Springer Series on Cultural Computing*. Cham: Springer International Publishing.

Gil-Quintana, J., Malvasi, V., Castillo-Abdul, B., & Romero-Rodríguez, L. M. (2020). Learning leaders: Teachers or youtubers? Participatory culture and STEM competencies in Italian secondary school students. *Sustainability*, 12(18), 7466.

Groshans, G., Mikhailova, E., Post, C., Schlautman, M., Carbajales-Dale, P., & Payne, K. (2019). Digital story map learning for STEM disciplines. *Education Sciences*, 9(75), 1-17. DOI: https://doi.org/10.3390/educsci9020075

Gui, Y., Cai, Z., Yang, Y., Kong, L., Fan, X., & Tai, R. H. (2023). Effectiveness of digital educational game and game design in STEM learning: A meta-analytic review. *International Journal of STEM Education*, 10(1), 36. DOI: https://doi.org/10.1186/s40594-023-00424-9

Gupta, R. (2019). Positive emotions have a unique capacity to capture attention. *Progress in brain research*, 247, 23-46. DOI: https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2019.02.001

Hamed, G., & Aljanazrah, A. (2020). The effectiveness if using virtual experiments on students' learning in the general physics lab. *Journal of*

Information Technology Education: Research, 19, 976-995. DOI: https://doi.org/10.28945/4668

Hamilton, D., McKechnie, J., Edgerton, E., & Wilson, C. (2020). Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: A systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design. *Journal of Computers in Education*, 8(1), 1-32. DOI: https://doi.org/10.1007/s40692-020-00169-2

Hariyady, H., Ibrahim, A., A., A., Teo, J., Suharso, W., Barlaman, M. B. F., Bitaqwa, M. A., & Weng, N. G. (2024). Virtual Reality and Emotional Responses: A Comprehensive Literature Review on Theories, Frameworks, and Research Gaps. In *ITM Web of Conferences* (Vol. 63, p. 01022). *EDP Sciences*. DOI: https://doi.org/10.1051/itmconf/20246301022

Huang, K., T., Ball, C., Cotten, S. R., & O'Neal, L. (2020). Effective experiences: A social cognitive analysis of young students' technology self-efficacy and STEM attitudes. *Social Inclusion*, 8(2), 213-221. DOI: 10.17645/si.v8i2.2612

Hughes, C., E., Dieker, L., A., Glavey, E., M., Hines, R., A., Wilkins, I., Ingraham, K., Bukaty, C., A., Ali, K., Shah, S., Murphy, J., & Taylor, M., S. (2022). RAISE: Robotics & AI to improve STEM and social skills for elementary school students. *Frontiers in Virtual Reality*, 3:968312. DOI: 10.3389/frvir.2022.968312

Kavanagh, S., Luxton-Reilly, A., Wuensche, B., & Plimmer, B. (2017). A systematic review of virtual reality in education. *Themes in science and technology education*, 10(2), 85-119.

Kay, R. (2022). Examining the Role of Emotions in Learning with Technology. *Journal of Digital Life and Learning*, 2(2), 12-26. DOI: 10.51357/jdll.v2i2.211

Kolb, D. A. (1984). Experience as the source of learning and development. Upper Sadle River: Prentice Hall, 1554-1573.

LaBar, K. S., & Cabeza, R. (2006). Cognitive neuroscience of emotional memory. Nature Reviews Neuroscience, 7(1), 54-64.

Lee, T., Wen, Y., Chan, M. Y., Azam, A. B., Looi, C. K., Taib, S., Ooi, C., H., Huang, L., H., & Cai, Y. (2024). Investigation of virtual & augmented reality classroom learning environments in university STEM education. *Interactive learning environments*, 32(6), 2617-2632. DOI: https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2155838

Lege, R., & Bonner, E. (2020). Virtual reality in education: The promise, progress, and challenge. *The JALT CALL Journal*, 16(3), 167–180. DOI: https://doi.org/10.29140/jaltcall.v16n3.388

Li, P., Fang, Z., & Jiang, T. (2022). Research Into improved Distance Learning Using VR Technology. Frontiers in Education, 7, 757874. DOI: 10.3389/feduc.2022.757874

Limone, P., & Toto, G., A. (2022). Psychological and Emotional Effects of Digital Technology on Digitods (14–18 Years): A Systematic Review. *Frontiers in Psychology*, 13, 938965. DOI: 10.3389/fpsyg.2022.938965

Macey, A.-L., Macey, J., & Hamari, J. (2022). Virtual reality in emotion regulation: A scoping review. In Bujić, M., Koivisto, J., & Hamari, J. (Eds.), *Proceedings of the 6th International GamiFIN Conference 2022*, 3147, 64-74. CEUR. https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202207045969

Mafarja, N., Mohamad, M. M., & Zulnaidi, H. (2024). Effect of Cooperative Learning With Internet Reciprocal Teaching Strategy on Attitude Toward Learning STEM Literacy. *SAGE Open*, 14(3). DOI: 21582440241280899.

Makkan, N., Brosens, J., & Kruger, R. (2020). Designing for positive emotional responses in users of interactive digital technologies: A systematic literature review. In Hattingh, M., Matthee, M., Smuts, H., Pappas, I., Dwivedi, Y.K., Mäntymäki, M. (eds) *Responsible Design, Implementation and Use of Information and Communication Technology*, Springer International Publishing, 441-451. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-45002-1_38

Marougkas, A., Troussas, C., Krouska, A., & Sgouropoulou, C. (2023). Virtual Reality in Education: A Review of Learning Theories, Approaches and Methodologies for the Last Decade. *Electronics*, 12, 2832. DOI: doi.org/10.3390/electronics12132832

Matovu, H., Ungu, D. A. K., Won, M., Tsai, C. C., Treagust, D. F., Mocerino, M., & Tasker, R. (2023). Immersive virtual reality for science learning: Design, implementation, and evaluation. *Studies in Science Education*, 59(2), 205-244. DOI: 10.1080/03057267.2022.2082680

Meccariello, A., & Mentasti, R. (2023). Le emozioni: strumenti di apprendimento ed inclusione. *Mizar. Costellazione di pensieri*, 18, 163-173. DOI: 10.1285/i24995835v2023n18p163

Minerva, R., Lee, G. M., & Crespi, N. (2020). Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models. *Proceedings of the IEEE*, 108(10). DOI: https://doi.org/10.1109/JPROC.2020.2998530

Ministero dell'Istruzione e del Merito (MIM). (2023). Linee guida per le discipline STEM. https://www.mim.gov.it/documents/20182/0/Linee+guida+STEM.pdf/2aa0b11f-7609-66ac-3fd8-2c6a03c80f77?version=1.0&t=1698173043586 [10/09/2024]

Montero-Izquierdo, A. I., Jeong, J. S., & González-Gómez, D. (2024). A future classroom lab with active and gamified STEAM proposal for mathematics and science disciplines: Analyzing the effects on pre-service teacher's affective domain. *Heliyon*, 10(16). DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35911

Muscarà, M., Romano, A., Lizio, A., & Carnazzo, V. (2024). Le Emotional Technologies nell'educazione: Sviluppo, impatto e prospettive per una pedagogia digitale innovativa. *Research Trends in Humanities Education & Philosophy*, 11, 10-18. DOI: https://doi.org/10.6093/2284-0184/10660

Natalini, A. (2022). Emozioni, processi di apprendimento e cultura emotiva. *Filosofi(e) semiotiche*, 9(2), 72-82.

Nersesian, E., Spryszynski, A., & Lee, M., J. (2019). Integration of Virtual Reality in Secondary STEM Education. *IEEE Integrated STEM Education Conference*, Princeton, USA, pp. 83-90. DOI: 10.1109/ISECon.2019.8882070

Niewint-Gori, J. (2023). Le STEM integrate. In Niewint-Gori et al. (2023). *Le STEM nella Rete Scientix, Italia: Riflessioni sulle STEM nella didattica*, Indire, Firenze, 45-48.

Noteborn, G., Carbonell, K., B., Dailey-Hebert, A., & Wim, G. (2012). The role of emotions and task significance in Virtual Education. *The Internet and Higher Education*, 15(3), 176-183. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2012.03.002.

Ogegbo, A., A., Penn, M., Ramnarain, U., Mdlalose, N., Pila, O., Van Der Westhuizen, C., Moser, I., Hlosta, M., & Bergamin, P. (2025). The Use of Virtual Reality Classrooms for Micro-Teaching Practice: Preservice Science Teachers' Experiences. *International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology*, 21(1), 209-225.

ONU (2015). Agenda 2030. https://unric.org/it/wp-content/uploads/sites/3/2019/11/Agenda-2030-Onu-italia.pdf [06/04/2025]

Pekrun, R. (2006). The control-value theory of achievement emotions: Assumptions, corollaries, and implications for educational research and practice. Educational psychology review, 18(4), 315-341. DOI: 10.1007/s10648-006-9029-9

Pellas, N., Dengel, A., & Christopoulos, A. (2020). A scoping review of immersive virtual reality in STEM education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 13(4), 748-761. DOI: 10.1109/TLT.2020.3019405

Piccioli, M. (2019). Educational research and mixed methods. Research designs, application perspectives, and food for thought. *Studi Sulla Formazione*, 22, 423-438. DOI: 10.13128/ssf-10815

Pradeep, K., Sulur Anbalagan, R., Thangavelu, A. P., Aswathy, S., Jisha, V. G., & Vaisakhi, V. S. (2024, December). Neuroeducation: Understanding neural dynamics in learning and teaching. *In Frontiers in Education*. Frontiers Media SA. DOI: 10.3389/feduc.2024.1437418

Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements, lessons learned, and research agenda. *Computers & education*, 147, 103778. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778

Roffi, A. (2022). Promuovere l'apprendimento delle STEM con le tecnologie educative nella scuola secondaria di secondo grado. X-Reality e STEM: opportunità e criticità. In *Esercizi di ricerca. Dottorato e politiche della formazione*, Firenze University Press, 267-270. DOI: 10.36253/979-12-215-0081-3.34

Ryan, M.D.G. (2013). Attitude and Motivation towards Learning Physics. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT),* 2(11), 2087-2094.

Sacharin, V., Schlegel, K., & Scherer, K. R. (2012). Geneva emotion wheel rating study. *Center for Person, Kommunikation, Aalborg University, NCCR Affective Sciences. Aalborg University, Aalborg*.

Salvadori, I. (2019). Approcci misti nella ricerca educativa: cosa sono? Da dove provengono? Dove sono diretti? Origini e prospettive future. *Formazione & insegnamento*, 17(3), 194-205. DOI: 10.7346/-fei-XVII-03-19_16

Scherer, K.R. (2009). Emotions are emergent processes: they require a dynamic computational architecture. *Philosophical transactions of the Royal Society,* (364), 3459-3474. DOI: https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0141

Serrano-Puche, J. (2015). Emotions and Digital Technologies: Mapping the Field of Research in Media Studies. *MEDIA@LSE Working Paper Series*, 33. http://goo.gl/8C31DK

Siirtola, P., Tamminen, S., Chandra, G., Ihalapathirana, A., & Röning, J. (2023). Predicting Emotion with Biosignals: A Comparison of Classification and Regression Models for Estimating Valence and Arousal Level Using Wearable Sensors. *Sensors*, *23,* 1598, 1-23. DOI: https:// doi.org/10.3390/s23031598

Somarathna, R., Bednarz, T., & Mohammadi G. (2022). Virtual reality for emotion elicitation – a review. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 14(4), pp. 1-21, DOI: https://doi.org/10.1109/TAFFC.2022.3181053

Soroko, N., V., Soroko, V., M., Mukasheva, M., Montes, M., M., A., & Tkachenko, V., A. (2021). Using of virtual reality tools for the development of steam education in general secondary education. *Information Technologies and Learning Tools*, 86(6), 87. DOI: 10.33407/itlt.v86i6.4749

Staniec, I., Kaczorowska-Spychalska, D., Kalinska-Kula, M., Szczygiel, N. (2022). The Study of Emotional Effects of Digitalised Work: The Case of Higher Education in the Sustainable Development. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(1), 576. DOI: https://doi.org/10.3390/ijerph19010576

Starkey-Perret, R., Deledalle, A., Jeoffrion, C., Rowe, C. (2017). Measuring the impact of teaching approaches on achievement-related emotions: The use of the Achievement Emotions Questionnaire. *British Journal of Educational Psychology*, 88(3): 446-464. DOI: https://doi.org/10.1111/bjep.12193

Steinert, S., & Roeser, S. (2020). Emotions, values and technology: illuminating the blind spots. *Journal of Responsible Innovation*, 7(3), 298-319. DOI: 10.1080/23299460.2020.1738024

Strojny, P., & Dużmańska-Misiarczyk, N. (2023). Measuring the effectiveness of virtual training: A systematic review. Computers & Education: X Reality, 2, 100006. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cexr.2022.100006

Tasiopoulou et al. (2022). *European Integrated STEM Teaching Framework*. October 2022, European Schoolnet, Brussels. https://www.indire.it/wp-content/uploads/2022/02/STEAM-IT_Framework.pdf. [13/09/2024].

Tene, T., Marcatoma Tixi, J., A., Palacios Robalino, MdL, Mendoza Salazar, M., J., Vacacela Gomez, C., & Bellucci, S. (2024) Integrating immersive

technologies with STEM education: a systematic review. Frontiers in Education, 9, 1410163. DOI: 10.3389/feduc.2024.1410163

Todino, M., D., Campitiello, L., & Di Tore, S. (2023). Simplexity to Improve Human-Machine Interaction in 3D Virtual Reality. *International Journal of Digital Literacy and Digital Competence* IGI Global, 4(1), 1-8. DOI: 10.4018/IJDLDC.330423

Uskali, T., Rautiainem, M., Juntunen, M., Tallavaara, R. & Hiljanen, M. (2023). In Jones, S., Dawkins, S., & McDougall, J., *Understanding virtual reality: challenging perspectives for media literacy and education*. (pp. 99-111). Routledge. DOI: 10.4324/9780367337032-11

Vandercammen, L., Hofmans, J., & Theuns, P. (2014). Relating specific emotions to intrinsic motivation: On the moderating role of positive and negative emotion differentiation. *PloS one*, 9(12). DOI:10.1371/journal.pone.0115396

Verawati, N., N., S., P., Ernita, N., & Prayogi, S. (2022). Enhancing the Reasoning Performance of STEM Students in Modern Physics Courses Using Virtual Simulation in the LMS Platform. *International Journal of Emerging Technologies in Learning* (iJET), 17(13), 267–277. DOI: https://doi.org/10.3991/ijet.v17i13.31459

Vistorte, A., O., R., Deroncele-Acosta, A., Ayala, J., L., M., Barrasa, A., López-Granero, C., & Martí-González, M. (2024). Integrating artificial intelligence to assess emotions in learning environments: a systematic literature review. *Frontiers in Psychology*, 15, 1387089. DOI: 10.3389/fpsyg.2024.1387089

Wahyudiati, D. (2023a). The effect of implementing IT-based chemistry teaching materials on the chemistry students' stem skills. *Journal of Educational and Social Research*, 13(3), 171-180. DOI: https://doi.org/10.36941/jesr-2023-0067.

Wahyudiati, D. (2023b). Enhancing Students' Communication and STEM Reasoning Abilities Based on Gender Through Application of IT-based Chemistry Teaching Materials. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 22(5), 160-179. DOI: https://doi.org/10.26803/ijlter.22.5.8

Watson, D., & Clark, L. A. (1994). The PANAS-X: Manual for the positive and negative affect schedule-expanded form. DOI: 10.17077/48vt-m4t2

Xie, T., Li, Y., & Tang, Y. (2023). Effects of using immersive virtual reality for science education on learning outcomes: A randomized controlled pilot study. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 16(6), 1045-1056. DOI: 10.1109/TLT.2023.3263587

Yang, C., Zhang, J., Hu, Y., Yang, X., Chen, M., Shan, M., & Li, L. (2024). The impact of virtual reality on practical skills for students in science and engineering education: a meta-analysis. *International journal of STEM education,* 11 (1), 1–15. DOI: https://doi.org/10.1186/s40594-024-00487-2

Zhang, Y., Feijoo-Garcia, M., A., Gu, Y., Popescu, V., Benes, B., & Magana, A. J. (2024). Virtual and augmented reality in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) education: an Umbrella Review. *Information*, 15(9), 515. DOI: https://doi.org/10.3390/info15090515

ALLEGATI

STRUMENTI DI RILEVAZIONE:

- AMOS (Abilità e motivazione allo studio: prove di valutazione e orientamento per la scuola secondaria di secondo grado e l'università), QUESTIONARIO SULLE CONVINZIONI – QC;
- PANAS (Positive and Negative Affect Schedule; Self-report measure to assess positive affect and negative affect);
- SCHEDA DI OSSERVAZIONE;

AMOS

De Beni et al.

Abilità e motivazione allo studio: prove di valutazione
e orientamento per la scuola secondaria di secondo grado e l'università

QUESTIONARIO SULLE CONVINZIONI – QC

PRIMA PARTE: TEORIA DELLA PROPRIA INTELLIGENZA

Indica il tuo grado di accordo per ciascuna delle affermazioni seguenti avvalendoti della seguente scala: 1 = fortemente d'accordo
2 = d'accordo
3 = abbastanza d'accordo
4 = abbastanza contrario 5 = contrario
6 = fortemente contrario.

	1	2	3	4	5	6
1. Tu hai un certo grado di intelligenza e puoi fare ben poco per cambiarla						
2. La tua intelligenza è qualcosa di te che non puoi cambiare molto						
3. Indipendentemente da chi tu sia, puoi sempre cambiare il tuo livello di intelligenza						
4. A essere sinceri, non puoi proprio cambiare la tua quantità di intelligenza						
5. Puoi sempre cambiare in misura notevole la tua quantità di intelligenza						
6. Puoi imparare cose nuove, ma non puoi cambiare la tua intelligenza						
7. Indipendentemente da quanta intelligenza tu abbia, puoi sempre cambiarne un po'						
8. Puoi cambiare in modo considerevole il tuo livello di base di intelligenza						

Seconda parte: Teoria della propria personalità

Indica il tuo grado di accordo per ciascuna delle affermazioni seguenti avvalendoti della seguente scala: 1 = fortemente d'accordo
2 = d'accordo
3 = abbastanza d'accordo
4 = abbastanza contrario 5 = contrario
6 = fortemente contrario.

	1	2	3	4	5	6
1. Alcune persone hanno una buona personalità, altre no e non possono cambiarla molto						
2. La personalità di ognuno è una parte di sé che può essere cambiata ben poco						
3. Una persona può fare delle cose per indurre gli altri ad apprezzarla, ma non può cambiare la sua vera personalità						
4. Indipendentemente dalla sua personalità, chiunque può sempre cambiare il suo modo di comportarsi						
5. Nessuno può cambiare molto la sua personalità						
6. La gente può sempre cambiare la propria personalità						

Terza parte: Fiducia nella propria intelligenza

1. Scegli l'affermazione che è più vera per te
   a) ❑ Di solito, penso di essere intelligente
   b) ❑ Mi domando se sono intelligente

Adesso, indica quanto è vera per te l'affermazione che hai scelto, ponendo una crocetta nel quadrato sottostante:

❑ molto vera ❑ vera ❑ vera fino a un certo punto

2. Scegli l'affermazione che è più vera per te
   a) ❑ Quando inizio una nuova lezione, di solito sono sicuro/a che sarà capace di impararla
   b) ❑ Quando inizio una nuova lezione, spesso penso che potrei non essere capace di impararla

Adesso, indica quanto è vera per te l'affermazione che hai scelto, ponendo una crocetta nel quadrato sottostante:

❑ molto vera ❑ vera ❑ vera fino a un certo punto

3. Scegli l'affermazione che è più vera per te

   a) ❑ Non ho molta fiducia nelle mie capacità intellettuali

   b) ❑ Ho abbastanza fiducia nelle mie capacità intellettuali

Adesso, indica quanto è vera per te l'affermazione che hai scelto, ponendo una crocetta nel quadrato sottostante:

❑ molto vera ❑ vera ❑ vera fino a un certo punto

Quarta parte: Fiducia nella propria personalità

1. Scegli l'affermazione che è più vera per te

   a) ❑ Quando incontro persone nuove, non sono sicuro/a che piacerò loro

   b) ❑ Quando incontro persone nuove, sono sicuro/a che piacerò loro

Adesso, indica quanto è vera per te l'affermazione che hai scelto, ponendo una crocetta nel quadrato sottostante:

❑ molto vera ❑ vera ❑ vera fino a un certo punto

2. Scegli l'affermazione che è più vera per te

   a) ❑ Se io fossi un'altra persona che sceglie un amico, non sono sicuro/a che sceglierei me stesso/a

   b) ❑ Se io fossi un'altra persona che sceglie un amico, sono sicuro/a che sceglierei me stesso/a

Adesso, indica quanto è vera per te l'affermazione che hai scelto, ponendo una crocetta nel quadrato sottostante:

❑ molto vera ❑ vera ❑ vera fino a un certo punto

3. Scegli l'affermazione che è più vera per te

   a) ❑ Sono sicuro/a che alla gente piaccia la mia personalità

   b) ❑ Non sono sicuro/a che alla gente piaccia la mia personalità

Adesso, indica quanto è vera per te l'affermazione che hai scelto, ponendo una crocetta nel quadrato sottostante:

❑ molto vera ❑ vera ❑ vera fino a un certo punto

Quinta parte: Percezione di abilità

Esprimi una valutazione delle seguenti dimensioni, secondo la scala:
1 = scarso/a
2 = insufficiente
3 = sufficiente
4 = buono/a5 = ottimo/a.

	1	2	3	4	5
1. La tua abilità di studio					
2. La personale facilità di studio					
3. Il tuo successo nello studio					
4. La tua possibilità di riuscita nello studio					
5. L'importanza per te di riuscire nello studio					

SESTA PARTE: OBIETTIVI DI APPRENDIMENTO

Per ogni coppia, scegli una delle due alternative, cerchiando la lettera a) oppure b).

In una situazione di studio preferisci affrontare:

a) compiti che sono abbastanza difficili e che affronti come sfide per misurare le tue abilità
b) compiti che sono abbastanza facili da darti la sicurezza di fare bene

a) compiti veloci e facili da fare, così non ti preoccupi di sbagliare
b) compiti difficili e nuovi così impari qualcosa

a) compiti che sono difficili, anche se c'è il rischio di sbagliare
b) compiti che sono facili, così non fai molti errori

a) compiti che sai già fare
b) compiti nuovi che non hai affrontato prima.

© 2014 R. De Beni et al., *AMOS,* Trento, Erickson

Positive and Negative Affect Schedule (PANAS-SF)

Date Accomplished:

		PER NULLA	POCO	MODERATAMENTE	ABBASTANZ	MOLTO
1. Interested	Interessato	☐	☐	☐	☐	☐
2.	Preoccupato	☐	☐	☐	☐	☐
3. Excited	Eccitato	☐	☐	☐	☐	☐
4.	Agitato	☐	☐	☐	☐	☐
5. Strong	Forte	☐	☐	☐	☐	☐
6.	Colpevole	☐	☐	☐	☐	☐
7. Scared	Impaurito	☐	☐	☐	☐	☐
8.	Ostile	☐	☐	☐	☐	☐
9. Enthusiastic	Entusiasta	☐	☐	☐	☐	☐
10.	Orgoglioso	☐	☐	☐	☐	☐
11. Irritable	Irritato	☐	☐	☐	☐	☐
12.	Vigile	☐	☐	☐	☐	☐
13. Ashamed	Vergognato	☐	☐	☐	☐	☐
14.	Ispirato	☐	☐	☐	☐	☐
15. Nervous	Nervoso	☐	☐	☐	☐	☐
16.	Determinato	☐	☐	☐	☐	☐
17. Attentive	Attento	☐	☐	☐	☐	☐
18.	Teso	☐	☐	☐	☐	☐
19. Active	Attivo	☐	☐	☐	☐	☐
20.	Spaventato	☐	☐	☐	☐	☐

Scoring

- **Positive Affect Score**: Add the scores on items 1, 3, 5, 9, 10, 12, 14, 16, 17, and 19. Scores can range from 10 – 50, with higher scores representing higher levels of positive affect.
- **Negative Affect Score**: Add the scores on items 2, 4, 6, 7, 8, 11, 13, 15, 18, and 20. Scores can range from 10 – 50, with lower scores representing lower levels of negative affect.

Your Scores on the PANAS: Positive: ☐ **Negative:** ☐

Additional Notes:

*Watson, D., Clark, L. A., & Tellegen, A. (1988). Development and validation of brief measures of positive and negative affect: the PANAS scales. Journal of personality and social psychology, 54(6), 1063.

https://Carepatron.com

Powered by carepatron

La griglia permette di osservare e valutare la lezione in modo strutturato, tenuto conto del DM 184 del 15 settembre 2023 e della Nota prot. 4588 del 24 ottobre 2023 nonché delle Linee guida STEM relative alle indicazioni metodologiche per le discipline STEM e dell'uso innovativo della tecnologia.

Griglia di Osservazione
Lezione di Chimica con Visori 3D in ambiente di Realtà Aumentata

1. Contesto e Obiettivi della Lezione

Obiettivi didattici
Quali obiettivi sono stati comunicati agli studenti?
Esempio: Acquisire competenze specifiche su [argomento], sviluppare capacità critiche, favorire l'apprendimento collaborativo.

_____

_____

_____

Collegamento con le indicazioni STEM
La lezione promuove attività pratiche, collaborative e basate sull'uso di tecnologie?
Sì / No / Parzialmente

Inclusività
Sono previste misure per studenti con disabilità o DSA?
Sì / No / Parzialmente

2. Metodologia Didattica

Uso della tecnologia:
I visori 3D e la realtà aumentata sono utilizzati in modo efficace per favorire l'apprendimento?
Sì / No / Parzialmente

Gli strumenti tecnologici supportano processi cognitivi come esplorazione, progettazione e costruzione di modelli?
Sì / No / Parzialmente

Attività pratiche e laboratoriali:
La lezione prevede momenti di sperimentazione o attività pratiche?
Sì / No / Parzialmente

Le attività sono significative e collegate agli obiettivi didattici?
Sì / No / Parzialmente

Apprendimento collaborativo:

Sono previsti momenti di lavoro in gruppo, problem solving o dibattito?
Sì / No / Parzialmente

Gli studenti collaborano attivamente per costruire conoscenze?
Sì / No / Parzialmente

3. Coinvolgimento degli Studenti

Protagonismo degli studenti:
Gli studenti sono coinvolti attivamente nella lezione?
Sì / No / Parzialmente

Hanno l'opportunità di fare domande, sperimentare o riflettere criticamente?
Sì / No / Parzialmente
Interazione con la tecnologia:

Gli studenti utilizzano i visori 3D in modo autonomo e consapevole?
Sì / No / Parzialmente

Mostrano interesse e curiosità verso gli strumenti tecnologici?
Sì / No / Parzialmente

Feedback e valutazione:
È previsto un momento di feedback o autovalutazione da parte degli studenti?
Sì / No / Parzialmente

4. Inclusività e Personalizzazione

Attenzione alle diversità:
La lezione tiene conto delle diverse potenzialità, capacità e stili di apprendimento degli studenti?
Sì / No / Parzialmente

Sono previsti adattamenti per studenti con disabilità o DSA?
Sì / No / Parzialmente

Personalizzazione dell'apprendimento:
Le attività sono differenziate in base alle esigenze individuali degli studenti?
Sì / No / Parzialmente

Gli strumenti tecnologici favoriscono un apprendimento personalizzato?
Sì / No / Parzialmente

5. Collegamenti con il Mondo Reale

Applicazioni pratiche:

La lezione collega i concetti teorici a problemi o situazioni reali?
Sì / No / Parzialmente

Vengono discussi possibili collegamenti con il mondo del lavoro o la vita quotidiana?
Sì / No / Parzialmente

Competenze trasversali:
La lezione promuove competenze come pensiero critico, creatività e collaborazione?
Sì / No / Parzialmente

6. Valutazione della Lezione

Efficacia didattica: La lezione raggiunge gli obiettivi prefissati?
Sì / No / Parzialmente
Gli studenti dimostrano di aver acquisito nuove conoscenze o competenze?
Sì / No / Parzialmente

Punti di forza: Quali aspetti della lezione hanno funzionato meglio?
Esempio: Uso innovativo della tecnologia, coinvolgimento attivo degli studenti, inclusività.

_____

_____

_____

Punti di miglioramento: Quali aspetti potrebbero essere migliorati?
Esempio: Maggiore attenzione alla personalizzazione, tempi più lunghi per le attività pratiche.

_____

_____

_____

7. Osservazioni Aggiuntive

Spazio per annotazioni libere su aspetti particolari della lezione, reazioni degli studenti, o suggerimenti per future attività.

_____

_____

ALLEGATI FOTOGRAFICI DELL'ESPERIENZA DIDATTICA SVOLTA NEL LABORATORIO VIRTUALE CON IL VISORE PICO-4 ALL IN ONE E L'APPLICAZIONE DEDICATA FUTUCLASS, SEZIONE "SCIENZECHIMICA"

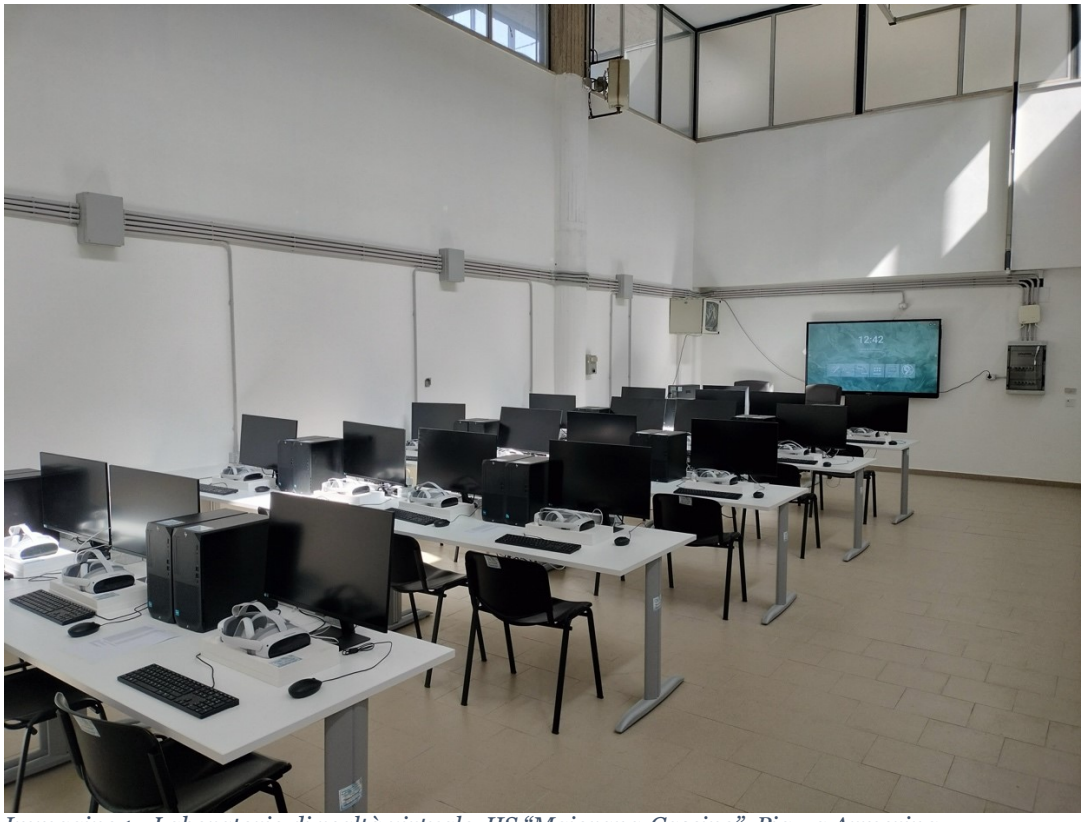


Immagine 1 - Laboratorio di realtà virtuale, IIS "Maiorana-Cascino", Piazza Armerina (EN)

Immagine 2 - Lezione con il visore e condivisione sulla LIM

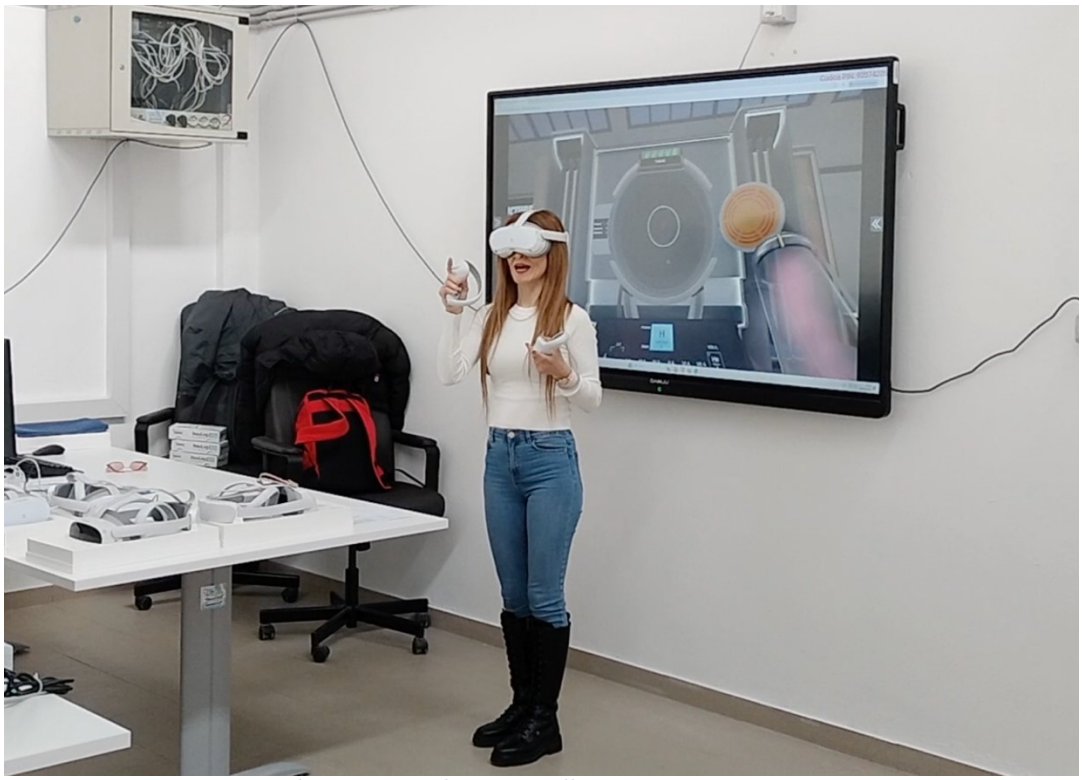


Immagine 3 - Lezione con il visore e condivisione sulla LIM

Immagine 4 - Esercitazione degli studenti con il visore

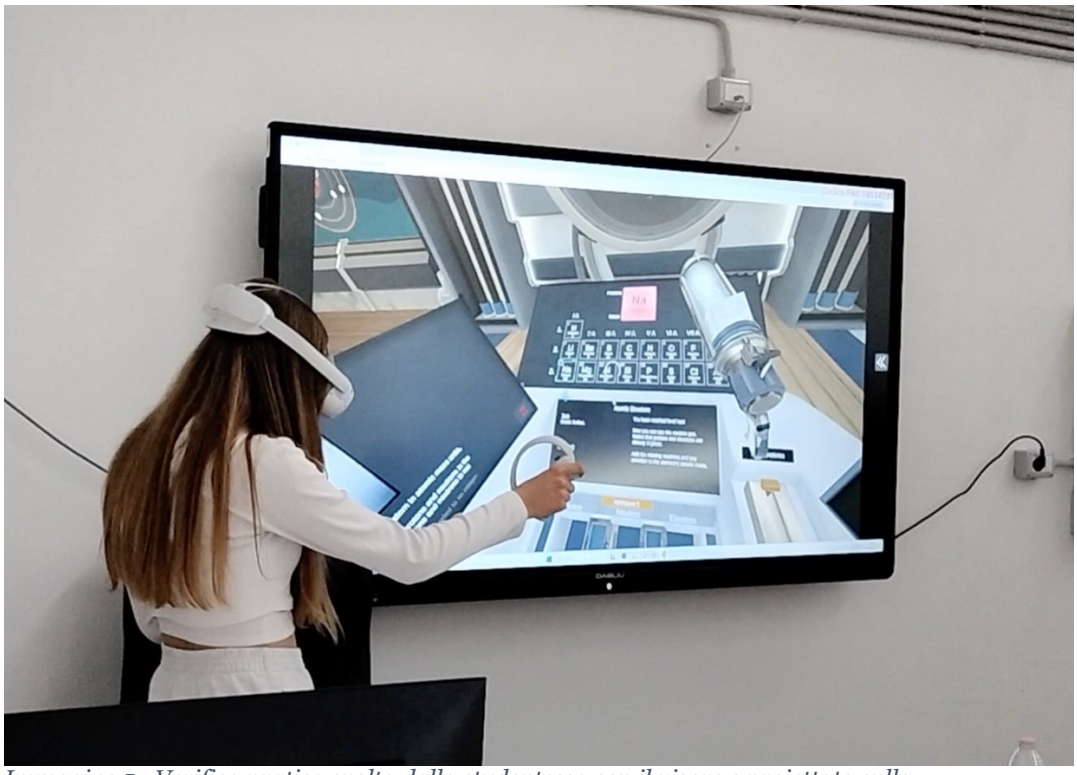


Immagine 5 - Verifica pratica svolta dalla studentessa con il visore e proiettata sulla LIM per consentire all'insegnante curricolare la valutazione

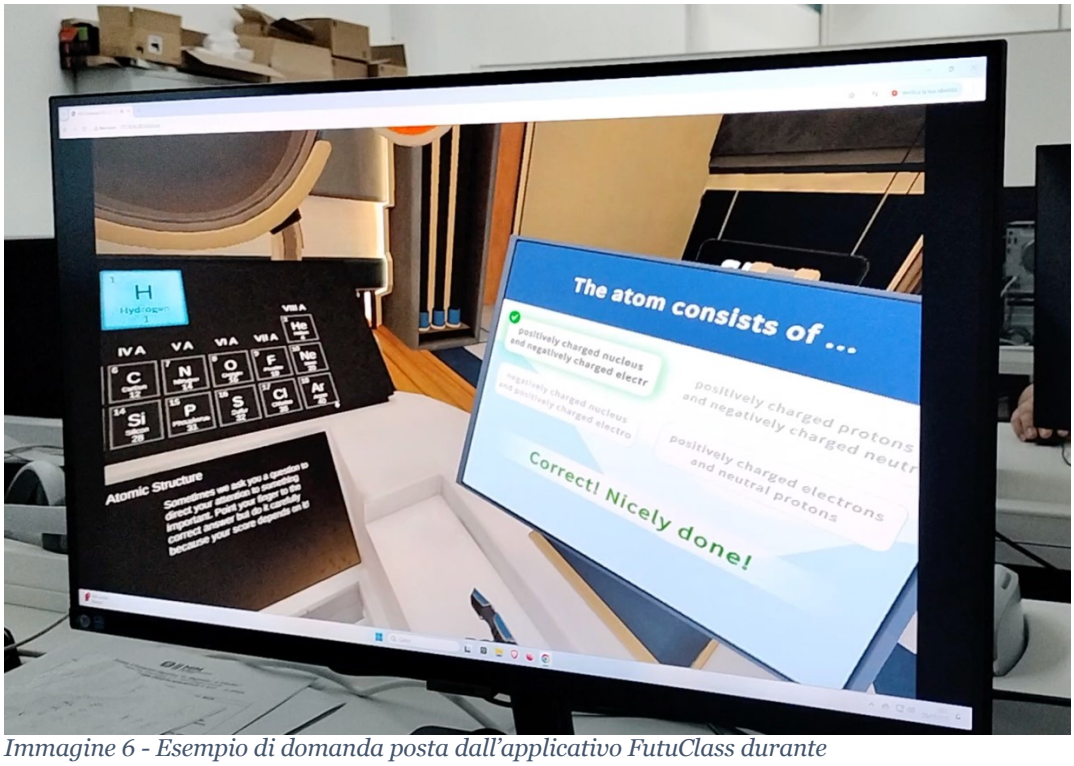


Immagine 6 - Esempio di domanda posta dall'applicativo FutuClass durante l'esercitazione svolta dallo studente

Immagine 7 - Home dell'ambiente di lavoro virtuale FutuClass

Immagine 8 - Ambiente di lavoro virtuale FutuClass: visualizzazione delle molecole sul tavolo di lavoro

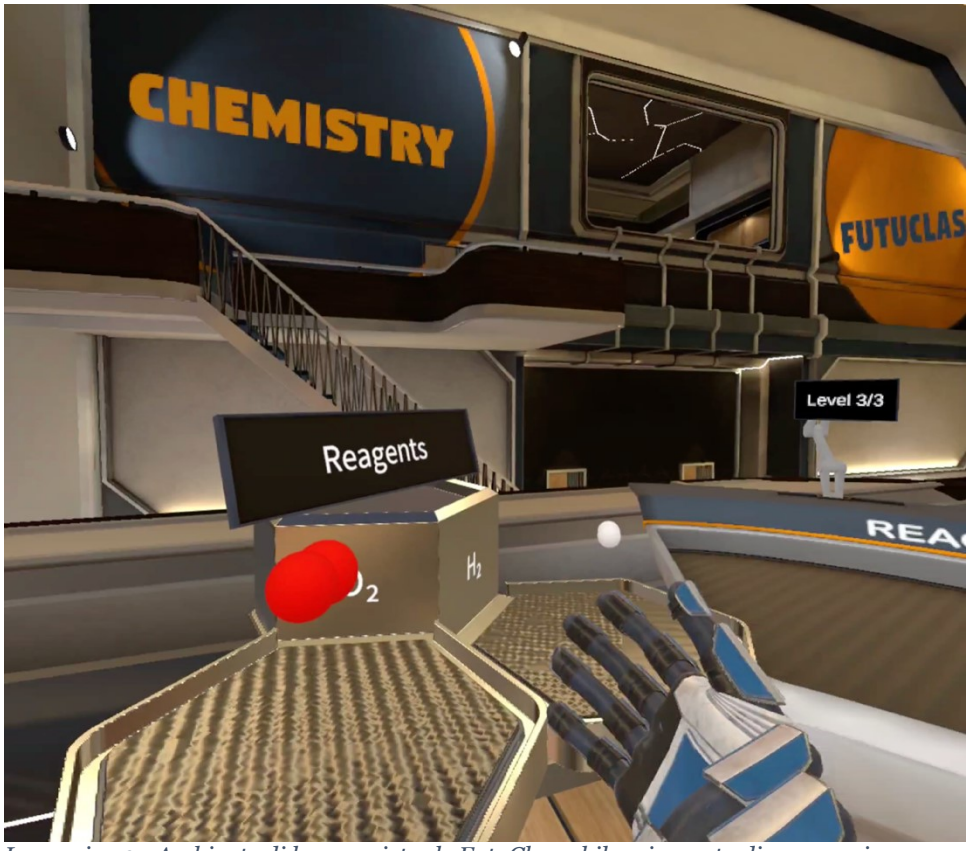


Immagine 9 - Ambiente di lavoro virtuale FutuClass: bilanciamento di una reazione con selezione di reagenti

Immagine 10 - Ambiente di lavoro virtuale FutuClass: visualizzazione della reazione bilanciata

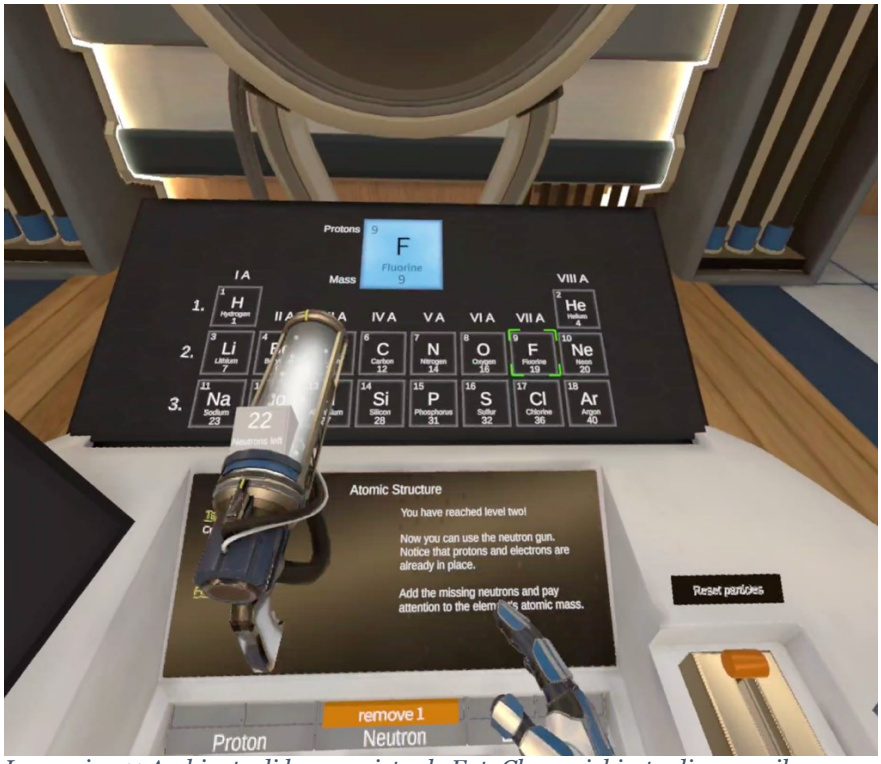


Immagine 11 Ambiente di lavoro virtuale FutuClass: richiesta di creare il fluoro aggiungendo neutroni alla particella data

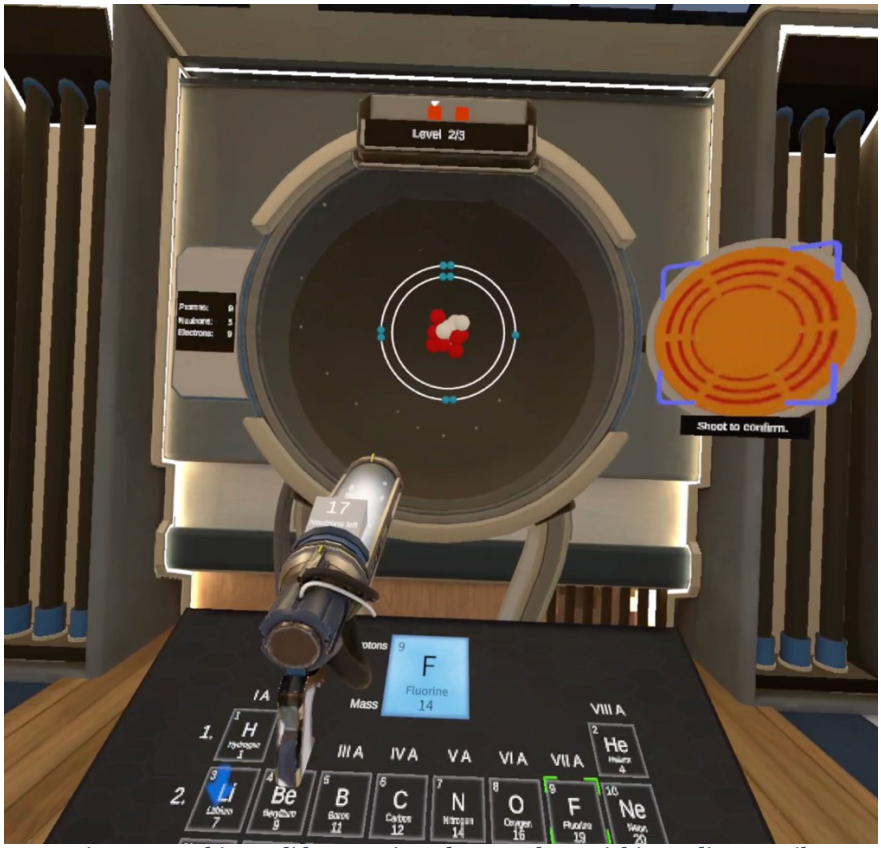


Immagine 12 - Ambiente di lavoro virtuale FutuClass: richiesta di creare il fluoro aggiungendo neutroni alla particella data

Immagine 13 - Ambiente di lavoro virtuale FutuClass: visualizzazione della tavola periodica

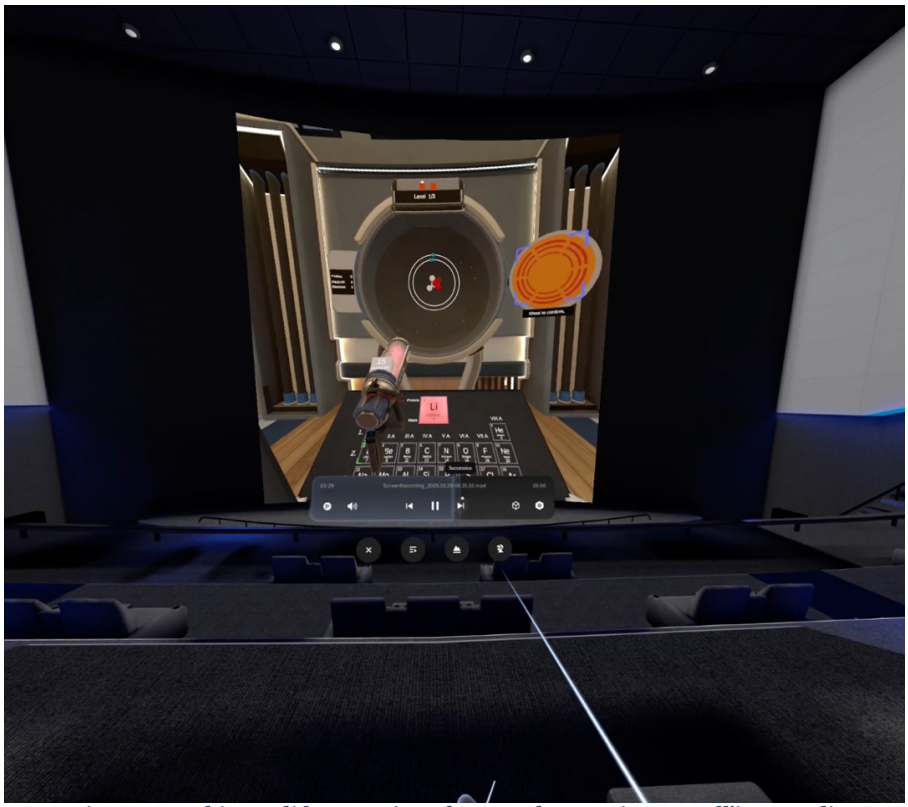


Immagine 14 - Ambiente di lavoro virtuale FutuClass – Cinema: all'internodi questo ambiente è
possibile rivedere la registrazione della propria esercitazione

Immagine 15 - Ipotesi di sviluppo: monitoraggio tramite biofeedback con strumenti di rilevazione NeuLog (segnale GSR e HR) durante la sessione d'uso in ambiente virtuale

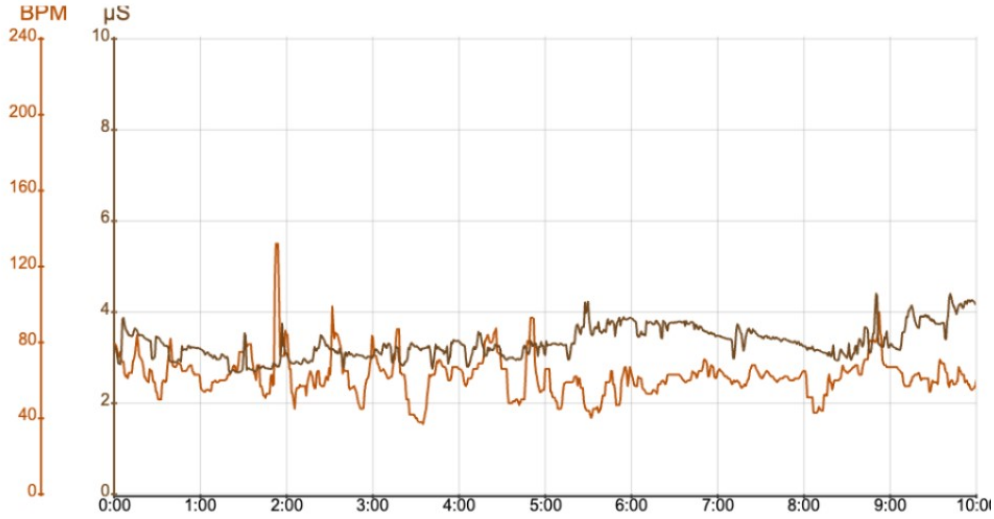


Immagine 16 - Esempio di rilevazione di segnali biofeedback eseguiti su studentessa durante una sessione di esercitazione con il visore