



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MACERATA

**CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN
FORMAZIONE, PATRIMONIO CULTURALE E TERRITORI**

CICLO 38°

TITOLO DELLA TESI

**«Modellare» territori immersivi: Sandbox AR, Streambox AR e sensori
low-cost per una nuova Didattica della Geografia**

SUPERVISORE DI TESI

Chiar.mo Prof. Simone Betti

Chiar.mo Prof. Lorenzo Bagnoli

DOTTORANDO

Dott. Lorenzo Virgini

COORDINATORICE

Chiar.ma Prof.ssa Anna Ascenzi

ANNO 2026



Seconda di copertina

“This work has been funded by the European Union - NextGenerationEU under the Italian Ministry of University and Research (MUR) National Innovation Ecosystem grant ECS00000041 – VITALITY, MUR D.D. n. 3277/2021, CUP n° D83C22000710005”

Dichiarazione di “non responsabilità”

I punti di vista e le opinioni espresse sono tuttavia solo quelli degli autori e non riflettono necessariamente quelli dell'Unione europea o della Commissione europea. Né l'Unione europea né la Commissione europea possono essere ritenute responsabili per essi”.

Acknowledgment

La presente tesi di dottorato è stata realizzata nell’ambito del Progetto VITALITY – Ecosistema dell’Innovazione, Digitalizzazione e Sostenibilità per l’Economia Diffusa nell’Italia Centrale (ECS00000041), finanziato dal Ministero dell’Università e della Ricerca nell’ambito del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) – Missione 4 “Istruzione e Ricerca”, Componente 2 “Dalla ricerca all’impresa”, Investimento 1.5 “Creazione e rafforzamento di ecosistemi dell’innovazione per la sostenibilità”, con fondi dell’Unione Europea – NextGenerationEU.

INDICE

INTRODUZIONE	5
 PRIMA PARTE: FONDAMENTI EPISTEMOLOGICI E QUADRI TEORICI DELLA DIDATTICA DELLA GEOGRAFIA	
1. Geografia come scienza della complessità	
1.1. Tra le scienze umane e quelle della terra: epistemologia geografica e ruolo disciplinare	11
1.2. Il pensiero geografico contemporaneo, tra descrittivismo e interpretazione dei fenomeni dello spazio	16
1.3. Didattica della Geografia: richiami storici e teorie contemporanee	21
1.4. La necessità di nuovi approcci didattici: un <i>Corpus degli apprendimenti geografici complessi</i>	27
1.5. Metodologia di elaborazione del <i>Corpus degli apprendimenti geografici complessi</i> : i KPI per la misurazione delle criticità nella fase di insegnamento- apprendimento di contenuti geografici	37
2. Quadri normativi e giuridici per l'innovazione tecnologica nella didattica della Geografia	
2.1. La normativa scolastica italiana per l'insegnamento della Geografia: linee guida e nuove indicazioni ministeriali	41
2.2. Il Curricolo verticale e l'integrazione delle competenze digitali e geografiche...	48
2.3. Riferimenti giuridici e deontologici per l'uso di tecnologie immersive in ambito educativo	53
3. L'evoluzione delle osservazioni geografiche: dalla diretta all'immersiva (AR, VR, MR)	

3.1. L'atto geografico dell'osservazione: definizioni, metodi tradizionali e limiti contemporanei	58
3.2. L'Osservazione Diretta (<i>Fieldwork</i>) e l'apprendimento del sapere geografico	64
3.3. L'Osservazione Indiretta (Cartografia, Immagini Satellitari, cartografia digitale) e la mediazione tecnologica	68
3.4. L'Osservazione Geografica Immersiva (OGI): un nuovo paradigma tra reale e virtuale	71
3.5. Il gap tecnologico e didattico: perché sviluppare strumenti low cost e open-source?	76

SECONDA PARTE: PROGETTARE, SVILUPPARE E PROTOTIPARE GEOTECNOLOGIE IMMERSIVE

4. Metodologie di progettazione e sviluppo di una Sandbox AR e dei suoi upgrades	
4.1. Stato dell'arte delle geotecnologie per la didattica: una review dei prodotti esistenti	86
4.2. <i>Design thinking</i> e progettazione centrata sull'utente (UCD): il modello metodologico	98
4.3. Analisi dei requisiti didattici e tecnologici: dal <i>Corpus</i> degli apprendimenti geografici complessi all'elaborazione del mediatore in AR	112
4.4. Architettura hardware e software: la scelta dei componenti e integrazione dei sistemi	118
4.5. Funzionalità e modelli geografici implementati: dalla topografia all'idrologia...	129
5. Gli <i>upgrade</i> tecnologici: dalla Sandbox AR alla Streambox AR e l'integrazione di simulatori Low-Cost	
5.1. La StreamBox AR: sviluppo di un simulatore geografico dinamico	132
5.2. Modelli di simulazione: idrologia, meteorologia, sismi	139

5.3. Integrazione dei dati e Osservazione Geografica Immersiva (OGI)	147
5.4. Strumenti di calibrazione e validazione tecnica: miglioramento della precisione e affidabilità dei modelli	150
6. Integrazione di modelli di Intelligenza Artificiale (ML-LLM) e GIS per l'analisi predittiva e la cartografia digitale	
6.1. Geographic Information Systems (GIS) e cartografia digitale: il ruolo nella Didattica	153
6.2. Integrazione della Sandbox e Streambox AR con i software GIS open-source (QGIS)	158
6.3. L'intelligenza Artificiale (AI) per l'analisi Geografica: modelli predittivi e interpretativi	162
 PARTE TERZA: SPERIMENTARE SUL CAMPO, ANALISI DEI RISULTATI E IMPLICAZIONI DIDATTICHE	
7. Protocolli di sperimentazione e valutazione dell'efficacia didattica	
7.1. Disegno sperimentale: metodologie quanti-qualitative (<i>mixed methods</i>)	167
7.2. Campioni di riferimento, raccolta dati e protocolli di intervento: Primaria e Secondaria di Primo e Secondo grado	172
7.3. Valutazioni dell'apprendimento dei contenuti geografici e confronto con il <i>Corpus degli apprendimenti geografici complessi</i>	178
7.4. Analisi statistica e interpretazione dei dati	182
7.5. Geotecnologie e inclusione: Sandbox e Streambox AR per studenti con Bisogni Educativi Speciali (BES).....	188
8. Sintesi dei risultati sperimentali e discussione	
8.1. Valutazione quanti-qualitativa degli esiti: miglioramenti nelle competenze spaziali e relazionali	192

8.2. Efficacia della didattica della geografia condotta con nuovi strumenti digitali e immersivi: validazione dei protocolli e delle tecnologie sviluppate	197
8.3. «Osservazioni» a confronto: evidenze e proposte teoriche	200
8.4. Le geotecnologie immersive come strumenti per la cittadinanza attiva e i patrimoni ambientali	208
CONCLUSIONI	215
BIBLIOGRAFIA	219
APPENDICI	241

INTRODUZIONE

Il lavoro triennale di ricerca presentato in questa tesi nasce dalla necessità di interrogare lo statuto epistemologico e didattico della Geografia contemporanea rispetto alle nuove sfide della complessità globale, proponendo un superamento delle aporie metodologiche – che ancora oggi caratterizzano in parte l’insegnamento della disciplina – attraverso l’integrazione di nuovi strumenti tecnologici derivati dal paradigma dell’Industria 4.0. L’indagine si colloca all’intersezione tra le scienze geografiche, le scienze dell’educazione e l’ingegneria dei sistemi, configurandosi come un tentativo organico di rifondare le pratiche dell’osservazione territoriale attraverso lo sviluppo, la prototipazione e la validazione sperimentale di geotecnologie immersive a basso costo e open-source, specificamente la Sandbox AR e la sua evoluzione dinamica, la Streambox AR, integrate con sistemi di Intelligenza Artificiale (AI).

La Geografia, intesa nella sua accezione più moderna e scientifica, ha compiuto nel corso degli ultimi decenni una transizione radicale, evolvendo da scienza idiografica, volta alla descrizione del particolare e alla catalogazione degli elementi visibili del paesaggio, a scienza nomotetica e infine a scienza della complessità sistemica. In questo orizzonte, lo spazio non è concepito soltanto come un contenitore inerte di oggetti fisici, bensì come un prodotto sociale dinamico, una matrice di processi reticolari in cui le sfere fisiche, ambientali e antropiche si compenetrano incessantemente in un gioco di retroazioni non lineari. Tuttavia, a fronte di tale evoluzione accademica ed epistemologica, si osserva una preoccupante frizione strutturale nel momento della trasposizione didattica, ovvero quel delicato processo di trasformazione del «sapere sapiente» in «sapere insegnato». Le pratiche d’aula e i mediatori didattici tradizionali, ancorati prevalentemente alla bidimensionalità della carta geografica e alla staticità del testo scritto o dell’immagine fissa, sembrano essersi cristallizzati in forme obsolete, incapaci di restituire la natura intrinsecamente quadridimensionale e transcalare dei fenomeni territoriali. Si assiste, dunque, a una dicotomia paralizzante tra la

linearità sequenziale dei programmi curricolari, che tendono ancora a parcellizzare il sapere in compartimenti stagni – separando la Geografia fisica da quella umana –, e la realtà ontologica del territorio, che richiede invece una lettura sistemica e integrata. Questa scollatura genera una forma di riduzionismo didattico che semplifica il reale fino a svuotarlo di senso, costringendo lo studente a memorizzare dati statistici e toponomastici slegati dalle dinamiche processuali che li hanno generati, e alimentando la percezione della Geografia come materia mnemonica e statica piuttosto che come chiave di lettura indispensabile per decodificare il presente.

Partendo da questa analisi critica, la ricerca ha preliminarmente identificato e sistematizzato un *Corpus degli apprendimenti geografici complessi*, definendo una matrice di nodi concettuali che rappresentano delle vere e proprie soglie critiche nel processo cognitivo (Dessen Jankell, Sandahl, Örbring, 2021; Kaminske, 1997). Attraverso l'analisi delle Indicazioni Nazionali e il confronto con la letteratura sui *Threshold Concepts*, sono state individuate macro-aree di criticità epistemologica – dall'area fisico-matematica legata all'astrazione dello spazio-tempo a quella sistemico-ambientale connessa all'invisibilità dei processi fluidi, fino alla sfera socio-economica della deterritorializzazione – che risultano ostiche per la maggioranza degli studenti proprio a causa dell'inadeguatezza dei mediatori tradizionali. La dissonanza cognitiva tra la tridimensionalità dinamica dei fenomeni reali (come i moti della Terra, il ciclo idrologico o la tettonica a placche) e la bidimensionalità statica degli strumenti utilizzati per rappresentarli crea un *gap* di visualizzazione che ostacola la comprensione profonda e favorisce il radicamento di misconcezioni resistenti.

In risposta a tale scenario problematico, la tesi propone l'adozione delle tecnologie immersive, segnatamente la Realtà Aumentata (AR), non come semplice orpello tecnologico o strumento di intrattenimento, ma come “protesi cognitiva” capace di abilitare un inedito paradigma osservativo: l'Osservazione Geografica Immersiva (OGI). Questa nuova modalità si pone come una “terza via” dialettica tra l'osservazione diretta (attraverso il *fieldwork*),

insostituibile per l'esperienza sensoriale ma limitata nello spazio e nel tempo, e l'osservazione indiretta (della cartografia), potente nell'astrazione ma cognitivamente onerosa. L'OGI, resa possibile dai dispositivi a tecnologie immersive – progettati e realizzati anche in questa ricerca –, permette di manipolare lo spazio-tempo mantenendo una dimensione sensoriale e aptica, realizzando una simulazione incarnata (*embodied simulation*) che trasforma i concetti astratti in esperienze concrete. L'ipotesi di fondo è che la manipolazione diretta della materia (nel caso di questa ricerca la sabbia di una Sandbox AR o graniglie plastiche di una Streambox AR), arricchita dalla sovrapposizione digitale di strati informativi dinamici (grazie al *software* di realtà aumentata), possa attivare canali cognitivi vicarianti, facilitando l'apprendimento anche – e soprattutto – per quegli studenti che presentano difficoltà nella decodifica simbolica astratta.

La ricerca si distingue per un approccio metodologico rigoroso e innovativo, che non si è limitato all'utilizzo di tecnologie esistenti, ma ha abbracciato l'intero ciclo di vita dello strumento tecnologico, dalla progettazione *hardware* e *software* alla prototipazione, fino alla validazione sul campo. Una parte sostanziale del lavoro è stata dedicata allo sviluppo della Sandbox AR e del suo *upgrade* evolutivo, la Streambox AR. Rifiutando la logica dell'acquisto di soluzioni commerciali chiuse e costose, che rischiano di aggravare il divario digitale tra istituzioni scolastiche di serie A e di serie B, si è scelto deliberatamente di perseguire la strada dell'*open source* e del *low cost*. Questa scelta non è dettata soltanto dalla logica di risparmio economico, ma risponde a un imperativo etico e politico preciso: democratizzare l'accesso agli strumenti di analisi spaziale avanzata e promuovere una cultura della trasparenza scientifica. L'architettura dei sistemi realizzati, integra sensori di profondità, video-proiettori e unità di calcolo *consumer* in strutture modulari e replicabili, permettendo a ogni scuola di costruire il proprio laboratorio geografico avanzato (Betti, Fratini, 2017). L'evoluzione verso la Streambox AR rappresenta un avanzamento tecnico significativo, introducendo simulatori meccatronici per la riproduzione fisica di fenomeni idrologici e meteorologici (moto ondoso, precipitazioni, deflusso fluviale) e l'integrazione di modelli di

Intelligenza Artificiale (AI) per l'analisi predittiva in tempo reale, aprendo nuove frontiere per l'inserimento dell'AI nei *curricula* scolastici anche di Geografia (Lee et al., 2025). In questo ecosistema ibrido, la sabbia non è più solo una superficie di proiezione, ma diventa un teatro geomorfologico attivo dove l'acqua reale interagisce con le geomorfologie modelate dagli studenti, mentre algoritmi di *machine learning* (ML) calcolano istantaneamente rischi e scenari futuri, rendendo visibile l'invisibile.

La validazione di tali strumenti è stata condotta attraverso un disegno sperimentale *mixed methods* che ha coinvolto un ampio campione di studenti e docenti della scuola secondaria di primo e secondo grado. L'integrazione di analisi quantitative, basate su test standardizzati pre e post intervento con gruppi di controllo e sperimentali, e di indagini qualitative, fondate su osservazioni partecipanti, questionari e diari di bordo, ha permesso di valutare l'efficacia didattica dell'approccio proposto. I risultati, discussi ampiamente nella terza parte del lavoro, evidenziano un miglioramento statisticamente significativo nelle performance di apprendimento del gruppo sperimentale, con un impatto trasformativo sulle competenze spaziali e sulla capacità di correlare variabili complesse. Di particolare rilievo è l'evidenza emersa relativa agli studenti con Bisogni Educativi Speciali (BES), per i quali l'uso della tecnologia immersiva ha agito come un potente fattore di inclusione e livellamento, diminuendo drasticamente il divario prestazionale iniziale rispetto al gruppo dei pari e dimostrando la validità dell'approccio basato sulla cognizione incarnata.

La tesi è strutturata in tre parti principali che riflettono l'articolazione logica del percorso di ricerca. La Prima Parte, dedicata ai fondamenti epistemologici e ai quadri teorici, analizza l'evoluzione del pensiero geografico dalla descrizione alla complessità, evidenziando le criticità della didattica tradizionale e definendo il *Corpus degli apprendimenti geografici complessi* che funge da bussola per l'intero lavoro. Vengono inoltre esaminati i quadri normativi nazionali ed europei, ponendo l'accento sulla necessità di un curriculum verticale che integri competenze digitali e geografiche, e vengono discussi i riferimenti etici e giuridici legati

all'uso delle tecnologie immersive. La Seconda Parte entra nel merito della progettazione e dello sviluppo tecnologico, descrivendo nel dettaglio le metodologie di *Design Thinking* e *User-Centered Design* adottate per la realizzazione dei prototipi. Vengono illustrate le architetture *hardware* e *software* della Sandbox e della Streambox AR, le scelte componentistiche orientate alla sostenibilità e *all'open-source*, l'implementazione dei modelli di simulazione idrologica, meteorologica e sismica. Un focus specifico è dedicato all'integrazione con i sistemi GIS (attraverso il *software open* QGIS) e all'utilizzo dell'Intelligenza Artificiale per l'analisi predittiva, mostrando come sia possibile trasformare l'osservazione in uno strumento di pianificazione e gestione del rischio. La Terza Parte, infine, restituisce gli esiti della sperimentazione sul campo, presentando i protocolli di intervento, l'analisi statistica dei dati raccolti e la discussione dei risultati. In questa sezione conclusiva, si propone una sintesi teorica che mette a confronto le diverse modalità di osservazione e si delineano le implicazioni pedagogiche delle geotecnologie immersive come strumenti per la cittadinanza attiva e la valorizzazione dei patrimoni ambientali.

Lo scopo di questo lavoro travalica la semplice validazione di un dispositivo didattico: attraverso la teorizzazione dell'Osservazione Geografica Immersiva (OGI) e la dimostrazione pratica della sua sostenibilità, la tesi intende contribuire al dibattito sul futuro dell'educazione geografica, sostenendo che l'innovazione tecnologica, se governata da una solida visione epistemologica ed etica, può restituire alla disciplina la sua vocazione originaria: non quella di descrivere un mondo dato, ma di fornire alle future generazioni gli strumenti cognitivi ed esperienziali per comprendere, abitare e custodire un pianeta complesso e fragile. In un'epoca di disintermediazione digitale e di crisi ecologica, formare "osservatori aumentati", capaci di navigare fluidamente tra le scale del territorio e di percepire le interconnessioni sistemiche tra azioni umane e risposte ambientali, diventa un imperativo di cittadinanza. La Geografia, mediata da tecnologie che rendono tangibile il futuro possibile, cessa così di essere materia scolastica marginale per affermarsi come sapere strategico per la sostenibilità e la democrazia spaziale.

PRIMA PARTE: FONDAMENTI EPISTEMOLOGICI E QUADRI TEORICI DELLA DIDATTICA DELLA GEOGRAFIA

1. Geografia come scienza della complessità

1.1 Tra le scienze umane e quelle della terra: epistemologia geografica e ruolo disciplinare

Le radici della disciplina geografica, nella sua accezione moderna, affondano in un intreccio complesso di tradizioni epistemologiche, in cui l'osservazione diretta del territorio ha costituito per secoli il perno metodologico dominante. Come osserva Paul Claval, «la geografia nasce dall'esigenza di descrivere e comprendere gli spazi vissuti» (Claval, Retaillé, 1995), e questo orientamento è rimasto dominante fino alla seconda metà del Novecento. Il paradigma prevalente, fortemente influenzato dall'impostazione positivista e dalla Geografia corografica, privilegiava la ricognizione empirica e sistematica degli elementi fisici e antropici che caratterizzavano un'area: rilievi morfologici, forme d'uso del suolo, distribuzione degli insediamenti e trame delle infrastrutture fungevano da indicatori per una lettura statica dei paesaggi. Tale prospettiva trovava legittimazione nell'idea che fosse possibile «cogliere l'essenza dei fenomeni territoriali mediante un esame accurato della loro manifestazione visibile» (Sestini, 1974) semplificando, in questo modo, la complessità in schemi classificatori relativamente lineari.

La relazione privilegiata tra geografo e terreno di indagine assumeva la forma di attività di campo essenzialmente descrittive; tuttavia già negli anni Settanta cominciavano a emergere critiche sostanziali a tale impostazione. Le trasformazioni sociali ed economiche mettevano in evidenza limiti epistemologici significativi: era ormai chiaro che il mero inventario degli elementi (fisici) non consentiva più di interpretare processi complessi quali urbanizzazione diffusa, frammentazione ecologica o mobilità transcalare (Giorda, 2017; Estes, Hortas,

Mendes, 2018). Come sottolinea Harvey, «lo spazio non è solo un contenitore neutrale ma un prodotto sociale» (Harvey, 2009), il che imponeva alla Geografia un salto concettuale verso strumenti analitici più profondi e critici. In questa fase, maturava l'esigenza di integrare la prassi osservativa con formalizzazione concettuale e modellizzazione quantitativa (la cosiddetta rivoluzione quantitativa), mirata ad avvicinare l'indagine geografica alle logiche della ricerca scientifica in senso più stretto.

Il percorso storico che conduce la disciplina alla contemporaneità è stato caratterizzato da una costante tensione tra due poli: da un lato quello delle scienze naturali – interessate allo studio dei processi fisici del pianeta e alle leggi che regolano i sistemi ambientali – dall'altro quello delle scienze umane – volto a interpretare pratiche sociali e didattiche, relazioni economiche e costruzioni culturali dello spazio

La geografia umana è storia, o se si vuole una delle scienze umane; la geografia fisica è scienza naturale [...]. I fatti umani non sono la continuazione di quelli fisici: sono un'altra cosa. E non si possono interpretare con i metri o con le leggi con cui si interpretano i fatti fisici [...]. Tra la realtà fisica e la realtà umana non c'è, in geografia, quel rapporto di causa ad effetto che i deterministi, più o meno palesi, volevano istituire: c'è solo un rapporto di interferenza, di reazione [che è sempre fatto storico] che le comunità umane oppongono alle condizioni dell'ambiente naturale¹.

Questa duplice appartenenza rappresentava tanto un punto di forza quanto una criticità metodologica: mentre favoriva un approccio capace di sintetizzare diverse dimensioni analitiche, complicava – al tempo stesso – la definizione condivisa di metodi e finalità disciplinari. Il passaggio da una Geografia essenzialmente corografica a forme più analitiche ha promosso concetti come territorializzazione e spazializzazione dei fenomeni, aprendo alla possibilità di leggere le relazioni uomo-ambiente come reti dinamiche superando l'idea delle

¹ Gambi chiarisce che il rapporto tra i due poli non è di continuità (determinismo), ma di interferenza. L'ambiente naturale fornisce il "palcoscenico" e pone dei vincoli, ma è l'uomo – attraverso la storia e la tecnologia – a dare significato e forma allo spazio. Questa posizione risolve la "tensione" citata nel concetto iniziale spostando l'attenzione dall'influenza della natura alla responsabilità politica e sociale dell'uomo nell'organizzazione del territorio. (Gambi, 1964).

semplici contiguità spaziali. Contestualmente si affermava un'attenzione crescente alle asimmetrie socio-spaziali – declinate in termini di esclusione territoriale, marginalità economica o segregazione urbana² (Dematteis, 1985; Governa, Memoli, 2011) – mostrando come lo spazio potesse essere al tempo stesso veicolo e prodotto di diseguaglianze. Raffestin sostiene infatti che «lo spazio è costruzione sociale consapevole o inconsapevole» (Raffestin, 2022), evidenziando la necessità di una lettura che integri dimensione materiale e simbolica.

Il rapporto tra Geografia fisica e Geografia umana si configura, quindi, come un'interdipendenza strutturale, in cui l'oggetto di indagine – il territorio – è intrinsecamente composto da elementi naturali e antropici che interagiscono in forme complesse e variabili nel tempo. Come osserva Conti, «lo spazio geografico è sempre costruito socialmente, pur restando vincolato a dati fisici» (Conti et al. 1991), mettendo così in luce la necessità di leggere l'articolazione fra vincoli geomorfologici e pratiche sociali. La spazializzazione, ossia la distribuzione di artefatti e fenomeni sulla superficie terrestre, costituisce un punto di partenza per individuare le modalità con cui i processi fisici (dinamiche geomorfologiche, climatiche, idrogeografiche) si intrecciano con gli assetti economico-politici e culturali.

Tale interazione non può essere interpretata solo nella logica della coesistenza: essa implica una territorializzazione, cioè «l'appropriazione dello spazio attraverso forme di uso, controllo e simbolizzazione da parte delle comunità» (Magnaghi, 2001); in questa prospettiva, il “dove” assume una valenza analitica primaria: localizzare un fenomeno significa collocarlo nel reticolo delle relazioni geografiche che lo determinano o che lo condizionano. La posizione nello spazio di un evento o di una risorsa diventa quindi elemento di connessione fra componenti naturali e componenti umane.

² In ambito italiano, questo passaggio epistemologico è stato analizzato da Giuseppe Dematteis. L'autore evidenzia come l'abbandono di una visione puramente “contenitiva” dello spazio a favore di una visione “relazionale” abbia permesso di svelare le gerarchie implicite nei territori. In quest'ottica, la marginalità e la segregazione non appaiono più come condizioni statiche o naturali, ma come l'esito di processi di valorizzazione selettiva (o de-valorizzazione) all'interno delle reti urbane e dei sistemi territoriali globali (Cfr. Dematteis, 1985, in particolare il cap. IV sulla *Versatilità e complessità del territorio*).

Nei suoi sviluppi attuali, quindi, la Geografia si traduce come multidisciplinarietà, «scienza della complessità» capace di interpretare spazi e sistemi territoriali caratterizzati da interazioni multiple, retroazioni e dinamiche non lineari. Come sottolinea Edgar Morin, «la conoscenza deve affrontare le interconnessioni delle parti e il tessuto che le lega» (Morin, 1993), prospettiva che impone un approccio integrativo capace di leggere simultaneamente diverse scale di analisi e livelli di significato. Come è naturale in questa prospettiva, la dimensione geografica oltrepassa la descrizione spaziale per sviluppare una comprensione sistemica delle relazioni tra ambiente fisico, strutture socioeconomiche e infrastrutture, richiamando una ormai nota osservazione in cui «il territorio emerge come prodotto e matrice di processi complessi» (Johnston et al. 2000).

Il confronto critico tra queste posizioni evidenzia come tale complessità insita nell'analisi geografica, non coincida con un semplice accumulo di variabili, piuttosto con una configurazione dinamica che richiede procedure interpretative capaci di rendere conto delle interdipendenze non lineari e dei mutamenti imprevisti. Una riflessione di Harvey orienta ulteriormente questa prospettiva, considerando lo spazio «non una mera superficie euclidea ma un costruito sociale impregnato di tempo» (Harvey, 2008), rimarcando l'insufficienza dei modelli puramente geometrici o quantitativi per rappresentare la profondità storico-sociale del territorio, un tempo privilegiati nello studio disciplinare.

L'articolazione critica della Geografia intesa come complessità implica, quindi, l'adozione di strumenti teorici ed empirici in grado di cogliere relazioni multiscalarì, intrecci semantici e dimensioni qualitative dei fenomeni territoriali; ciò comporta la necessità di «un pensiero che colleghi piuttosto che separare» (Morin, 1993), capace di integrare materiali diversi senza ridurli soltanto alla semplificazione analitica; questa convergenza, fra il metodo fenomenologico e la posizione socio-materiale proposta, suggerisce l'urgenza di modelli interpretativi integrati, che mettano in dialogo scienze sociali e umane con approcci quantitativi avanzati. La naturale conseguenza di questo approccio multilivello impone una riflessione critica rispetto ai limiti delle formalizzazioni geometrico-matematiche: se da un lato

forniscono schemi predittivi utili alla pianificazione spaziale, dall'altro rischiano forme di «riduzionismo cartografico» (Johnston et al. 2000), cioè una traduzione del territorio in forme grafiche che ne attenuano la complessità reale. Un approccio scientificamente rigoroso in Geografia richiede, dunque, una continua riflessione sulle procedure adottate nell'analisi e nelle rappresentazioni, soprattutto rispetto a quei *bias* epistemici insiti negli stessi strumenti adottati dalla disciplina. La relazione che si innesca per la Geografia – anche nelle sue declinazioni didattiche – riguarda, quindi, i rapporti tra le scienze umane e quelle della Terra; questo è certamente un ambito di indagine complesso, la cui analisi richiede un approccio metodologico rigoroso e una prospettiva epistemologica capace di interrogare criticamente le basi teoriche del dialogo interdisciplinare: «la geografia [infatti] non può essere ridotta alla sola descrizione dello spazio, poiché essa elabora concetti interpretativi che mettono in relazione natura e società» (Livingstone, 1992). Una posizione che supporta l'idea di come il sapere geografico operi su diversi piani di astrazione, fungendo da ponte fra le dimensioni culturali e fisiche nello studio dello spazio (Betti, Rocca, 2012): «le rappresentazioni dello spazio sono sempre prodotti sociali, carichi di significati e ideologie implicite» (Giorda, 2017; Johnston et al. 2000). Questa consapevolezza implica la necessità di esplicitare gli assunti teorici che orientano la ricerca: i modelli utilizzati, le categorie concettuali adottate e le metodologie di trasmissione devono essere oggetto di una continua riflessione disciplinare, visto che il territorio e «il paesaggio [sono] una costruzione culturale che riflette valori, poteri e visioni del mondo» (Cosgrove, 1990), ponendo così l'accento sulla natura non neutrale delle osservazioni geografiche.

Guardando ai confronti storici tra prospettive positiviste e interpretative della Geografia emerge una feconda dissertazione: mentre l'approccio quantitativo tende a privilegiare misurazioni precise e generalizzazioni estensive, quello qualitativo sottolinea la dimensione situata dell'esperienza spaziale che «non è mai solo dato fisico, ma anche arena di conflitti politici e sociali» (Harvey, 2009); ciò richiama l'attenzione, anche, sui processi storici che definiscono le configurazioni territoriali. In questo quadro diventa centrale considerare come

le carte geografiche, lungi dall'essere semplici strumenti tecnici, siano prodotti discorsivi capaci di influenzare percezioni e decisioni sociali collettive. Questa prospettiva si allinea con la visione del “paesaggio come teatro” (Turri, 1998), in cui l'uomo è al contempo attore che modella il territorio e spettatore che lo osserva, una dualità che le tecnologie immersive permettono oggi di ricomporre.

1.2 Il pensiero geografico contemporaneo, tra descrittivismo e interpretazione dei fenomeni dello spazio

L'evoluzione del pensiero descrittivo in Geografia riflette un passaggio complesso e stratificato da una concezione che vedeva la disciplina come registrazione e catalogazione del reale a una interpretazione critica dei processi spaziali, percorso che appare intrecciato con mutamenti epistemologici, metodologici e tecnologici. In origine il paradigma descrittivo si fondava su una visione fisica dello spazio: l'oggetto geografico veniva scomposto in elementi eterogenei – morfologia, idrografia, insediamenti, usi del suolo – organizzati secondo tassonomie relativamente rigide, dove la neutralità apparente dell'osservatore costituiva un presupposto implicito³ (Farinelli, 2003; Casti, 2020). Tale impostazione risultava funzionale a finalità enciclopediche o di pianificazione elementare, ma incorporava il rischio di reificare configurazioni territoriali transitorie come se fossero strutture stabili⁴ (Dematteis, 1985). Nel corso del Novecento, e in particolare nella seconda metà, quella che sembrava essere una solida e unica via interpretativa viene progressivamente messa in discussione. Le trasformazioni sociali e ambientali su scale diverse hanno reso evidente l'insufficienza di una

³ Farinelli ha decostruito radicalmente il concetto di “descrizione neutrale” attraverso la critica alla ragione cartografica. Secondo l'autore, la Geografia moderna ha spesso confuso il mondo con la sua rappresentazione su mappa, illudendosi che la descrizione geometrica dello spazio corrispondesse alla realtà delle cose. La mappa riduce la Terra a una tavola immobile, eliminando il tempo e le relazioni dinamiche, creando così l'illusione di un osservatore esterno e oggettivo che, in realtà, non esiste.

⁴ Dematteis, nel suo testo fondamentale *Le metafore della Terra*, evidenzia come la descrizione geografica non sia mai una “copia” della realtà, ma sempre una metafora, una costruzione intellettuale. Il rischio della Geografia tradizionale era quello di considerare le regioni, gli stati o i paesaggi come oggetti fisici immutabili (reificazione), mentre essi sono sistemi aperti in continua evoluzione (geografia a geometria variabile).

descrizione statica, incapace di cogliere le trame relazionali tra componenti fisiche e antropiche: l'urbanizzazione diffusa, la globalizzazione delle economie locali e i processi migratori internazionali mostrano, a esempio, come lo spazio non sia contenitore neutro ma prodotto sociale e politico (Giorda, 2017; Turco, 1988). La descrizione, pur mantenendo un ruolo importante quale fase di documentazione empirica e nell'osservazione diretta, è stata così destinata al momento iniziale del processo conoscitivo, da integrare con modelli interpretativi capaci di affrontare la transcalarità dei fenomeni e la loro natura sistemica. Un elemento critico dell'evoluzione è rappresentato dalla progressiva apertura alla dimensione interdisciplinare: mentre il pensiero descrittivo tradizionale tendeva all'auto-referenzialità, le nuove prospettive interpretative hanno cercato connessioni con altri ambiti scientifici. Ne deriva che lo spazio possa essere letto simultaneamente secondo trame analitiche mutuabili da diverse altre discipline (Vallega, 2004). Questo movimento ha determinato, tuttavia, una tensione interna: da un lato l'esigenza di preservare la specificità metodologica della Geografia, dall'altro la necessità di ibridarsi per affrontare oggetti d'indagine sempre più complessi. In tal senso la polisemia del concetto di «territorializzazione» conferma il superamento dell'atto esclusivamente descrittivo verso una elaborazione concettuale che includa anche le pratiche sociali di appropriazione dello spazio. In questo senso, il paradigma descrittivo classico si è dovuto anche confrontare con le sfide pedagogiche: le pratiche didattiche tradizionali basate su memorizzazione di nozioni topografiche o elenchi di dati mal si adattano agli sviluppi cognitivi degli studenti delle classi della scuola primaria e secondaria, risultando invece funzionale un loro coinvolgimento nella pianificazione dell'attività formativa affinché potessero percepire la relazione diretta tra contenuti geografici e vissuto quotidiano (De Vecchis, 2011; De Vecchis, Pasquinelli D'Allegra, Pesaresi, 2020). La rigidità cronotopica della Geografia ha ceduto così spazio ad approcci costruttivisti in cui la rappresentazione dello spazio avviene attraverso linguaggi molteplici – cartografie interattive, schematizzazioni iconiche, contenuti digitali – tali da stimolare contemporaneamente competenze linguistiche, tecniche e analitiche (Giorda, 2014). In questa traiettoria evolutiva un

ruolo determinante è stato svolto dagli strumenti tecnologici: la cartografia tematica prima e i sistemi informativi geografici (GIS) successivamente, hanno consentito di integrare nei processi formativi informazioni quantitative complesse senza rinunciare alla capacità comunicativa della rappresentazione visiva; ne deriva una trasformazione della descrizione stessa che diventa modellizzazione selettiva secondo criteri teoricamente fondati. Inoltre, l'introduzione recente di applicazioni in Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR) nella didattica della Geografia, porta all'estremo questa tendenza allargando il confine classico dell'osservazione sul campo rispetto alla simulazione laboratoriale e all'osservazione indiretta: lo studente può muoversi all'interno di paesaggi virtualmente ricostruiti dove i dati – climatici e fisici – possono sovrapporsi alle distribuzioni demografiche o economiche. Dal punto di vista epistemologico tale cambiamento implica il riconoscimento che ogni descrizione comporta scelte teoriche implicite: selezionare cosa rappresentare significa attribuire importanza a determinate variabili a scapito di altre. Di conseguenza il pensiero descrittivo contemporaneo assume nuove cornici di senso tanto nel campo della ricerca quanto in didattica: non si presenta più come un neutro inventario di nozioni ma come dispositivo interpretativo situato storicamente e culturalmente⁵ (Minca, 2001).

A differenza del paradigma descrittivo, gli indirizzi critici contemporanei pongono al centro dell'indagine la natura costruttiva delle configurazioni territoriali: lo spazio non viene inteso come semplice contenitore, ma come prodotto storico e socio-politico derivante da processi di territorializzazione stratificati nel tempo⁶ (Raffestin, 2022; Turco, 1988; Banini, 2019; Minca, 2022). Questo implica un ribaltamento del ruolo dell'osservatore, ora chiamato a esplicitare le premesse teoriche e le implicazioni politiche delle proprie rappresentazioni

⁵ Per Claudio Minca, «il sapere geografico è quindi un sapere strategico di cui, chi detiene il potere, vuole avere sempre il controllo perché esso permette di far vedere il potere uguale alle cose naturali (lo naturalizza) e di far vedere le cose naturali eguali al potere (le normalizza). Naturalizzando il potere, la geografia lo legittima e occulta la sua reale natura assicurando così la dovuta sottomissione da parte degli individui» (Ivi.).

⁶ Mentre la Geografia classica – Turco, Raffestin – definiva la territorializzazione come l'azione del potere sullo spazio (denominare, strutturare), gli studi più recenti, come quelli di Tiziana Banini, spostano l'attenzione sulla dimensione soggettiva e identitaria. Non è solo lo Stato a creare il territorio, ma siamo noi attraverso le nostre pratiche quotidiane e le nostre emozioni (Cfr. concetto di geografie emozionali, Di Gioia, 2025).

cartografiche e analitiche. In questo quadro, l'atto cartografico – lo strumento per eccellenza del descrittivismo geografico – non risulterebbe più soltanto una trascrizione della morfologia territoriale ma diventa un'operazione selettiva, che accentua o oscura certe relazioni spaziali in funzione delle finalità conoscitive o di necessità (Farinelli, 2003; Kitchin, 2011; Casti, 2020)⁷. Tali strumenti concettuali permettono di interrogare criticamente tanto le geografie ufficiali filtrate dal potere statale quanto quelle informali emergenti dalle pratiche territoriali quotidiane⁸.

Sul piano didattico-educativo queste prospettive si traducono in modalità formative orientate all'apprendimento attivo e riflessivo. L'insegnamento della Geografia viene articolato come esercizio continuo di confronto fra teorie esplicative e osservazioni empiriche: l'utilizzo critico di fonti cartografiche, articoli specialistici o reportage ambientali favorisce negli studenti la capacità di vagliare attendibilità e interessi impliciti nei materiali proposti (De Vecchis, Pasquinelli d'Allegra, Pesaresi, 2020; Giorda, Puttilli, 2021⁹). Anche strategie didattiche inclusive basate sull'Universal Design for Learning contribuiscono ad ampliare i canali comunicativi dell'apprendimento geografico, consentendo a ciascuno di sviluppare competenze attraverso linguaggi visivi o multimediali (Pesaresi, 2016; Id, 2007; Pasquinelli d'Allegra, 2022). La pluralità delle modalità espressive non è un semplice supporto accessorio ma parte integrante della costruzione critica del sapere: confrontar. In questo contesto tecnologico-pedagogico trovano spazio strumenti avanzati come la realtà aumentata (AR) e

⁷ L'atto cartografico oggi non è più statico (la mappa di carta), ma dinamico e algoritmico. Emanuela Casti parla di cartografia riflessiva: nel digitale, l'utente non è solo spettatore ma co-autore (può zoomare, filtrare, aggiungere dati). Tuttavia, Rob Kitchin avverte che questo potere è illusorio se non capiamo il codice sottostante.

⁸ L'introduzione dei *Big Data* e delle *Smart Technologies* nell'analisi geografica non è neutra. Recentemente, studiosi come Kitchin avvertono sul rischio del nascente «*Dataism*»: la fede cieca nel dato quantitativo digitale. Una geografia critica moderna deve insegnare che un modello 3D o una mappa di calore non sono la realtà oggettiva, ma il prodotto di algoritmi scritti da esseri umani con specifici *bias* culturali ed economici. Insegnare a leggere il codice dietro la mappa è la nuova frontiera dell'alfabetizzazione cartografica.

⁹ La didattica non mira più solo a far memorizzare i luoghi, ma a formare la *Spatial Citizenship*. Secondo Giorda e Puttilli, lo studente deve capire che ogni scelta spaziale (dove costruire una scuola, come gestire un parco) è una scelta etica e politica (Giorda, Puttilli, 2021).

virtuale (VR), che possono essere impiegati per simulare scenari alternativi a partire da modelli geografici o urbanistici esistenti (Kerski, 2020; Neri, Malatesta, 2022; Gagliardo, Ronconi, Vocaturo, 2001). L'utilizzo critico di queste tecnologie offre l'opportunità di mettere alla prova ipotesi interpretative direttamente nello spazio simulato, consentendo agli utenti, studenti o ricercatori, di valutare conseguenze ambientali o sociali prima che esse si concretizzino nel mondo fisico. Emerge, tuttavia, il rischio di confondere la fedeltà visiva dell'ambiente virtuale con la validità scientifica dei dati su cui esso si basa; da ciò deriva la necessità di integrare esperienze immersive con attività analitiche tradizionali volte alla verifica delle fonti. Interventi didattici che utilizzano come strumenti i *geo-browser*, a esempio, permettono agli studenti già a partire dalla scuola primaria di confrontare mappe ufficiali con rilievi diretti effettuati nel quartiere, favorendo una precoce abilità critica nella valutazione delle fonti informative (Giorda, 2014; La Foresta, 2025). Questa dialettica fra osservazione ed elaborazione concettuale è ciò che distingue gli approcci interpretativi maturi dalla ormai superata concezione esclusivamente descrittiva delle precedenti stagioni epistemologiche della Geografia: attraverso questi strumenti digitali, ogni dato è inserito in un contesto esplicativo più ampio capace di renderne conto sia nei termini delle forze biofisiche sia nelle logiche socialmente determinate che ne condizionano sviluppo e percezione pubblica (Greiner, Dematteis, Lanza, 2016; Bignante, Celata, Vanolo, 2023). Gli approcci interpretativi e critici rafforzano, dunque, l'autonomia analitica della disciplina senza isolarla; al contrario, essa viene costantemente posta in relazione dialogica con altri saperi scientifici e forme culturali di produzione dello spazio. Questa tensione verso l'apertura interdisciplinare consente alla Geografia contemporanea non soltanto di descrivere scenari complessi ma anche di contribuire all'elaborazione condivisa di politiche territoriali sostenibili eque sul piano sociale ed efficaci su quello ambientale.

1.3 Didattica della Geografia: richiami storici e teorie contemporanee

I metodi didattici tradizionali nell'insegnamento della Geografia si sono storicamente sviluppati in un quadro pedagogico dominato dalla funzione enciclopedica della disciplina, dove la trasmissione del sapere avveniva prevalentemente per via espositiva e passiva, con scarso spazio alla costruzione autonoma di competenze da parte dello studente. Tale approccio si basava sulla centralità del testo scritto, manuali scolastici, atlanti cartografici statici, dispense, come fonte primaria per le conoscenze geografiche, ponendo l'attenzione sul recupero mnemonico di dati topografici, confini amministrativi, caratteristiche morfologiche e climatiche. La risorsa principale era costituita da mappe politiche e fisiche concepite come rappresentazione definitiva di entità territoriali¹⁰; il loro uso in contesto didattico raramente comportava attività di interpretazione critica o confronto con fonti alternative, implicando pertanto una reificazione delle configurazioni spaziali proposte dal manuale (Farinelli, 2009; De Vecchis, 2011). In questo quadro, la territorializzazione veniva implicitamente presentata come un fatto compiuto: le linee di confine apparivano immutabili e le denominazioni toponomastiche acquisite come elementi privi di contesto storico-politico. Tale impostazione si poneva in continuità con la visione positivista dell'osservazione geografica, nella quale lo spazio era inteso prevalentemente in termini di superficie misurabile. L'attività in classe consisteva per lo più nel riprodurre carte su quaderni o nello svolgere esercizi di localizzazione di fenomeni fisici o umani predefiniti: la spazializzazione veniva assorbita come dato oggettivo e non come processo. Se pure era prevista in taluni casi l'osservazione del territorio, essa si svolgeva quasi esclusivamente in forma indiretta, attraverso fotografie aeree o immagini statiche predisposte dall'insegnante senza stimolare negli studenti particolari capacità investigative (Bignante, 2011; Crampton, 2009). La logica trasmissiva propria dei metodi tradizionali produceva specifici effetti rispetto al carico cognitivo dello studente:

¹⁰ Il processo per cui la mappa, da rappresentazione (soggettiva) della realtà, viene scambiata per la realtà stessa (oggettiva). Franco Farinelli ha ampiamente dimostrato come la geografia scolastica tradizionale abbia "ipostatizzato" lo Stato-nazione, rendendo i confini politici naturali quanto i fiumi o le montagne.

l'apprendimento avveniva spesso su livelli generali e astratti, con difficoltà a collegare le informazioni mediate dal libro alla realtà locale vissuta quotidianamente. Si creava, in questo modo, un divario fra conoscenza dichiarativa (sapere che) e conoscenza procedurale (sapere come), poiché mancavano momenti didattici dedicati all'applicazione pratica del sapere geografico in contesti esperienziali concreti (Giorda, 2014; Giorda, 2017). Questa tendenza per le categorie geografiche impediva anche il riconoscimento delle trasformazioni spazio-temporali: un territorio montano, a esempio, descritto come area agricola poteva aver già subito processi di de-agrarizzazione o turisticazione non rilevabili nelle sintesi manualistiche. Nella prospettiva relazionale delineata nelle teorie contemporanee, come si è descritto in precedenza, tali strategie appaiono metodologicamente limitanti; esse presuppongono un rapporto gerarchico tra docente (unico depositario dell'*expertise* disciplinare) e discente (recettore passivo delle nozioni), relegando lo studente a ruolo marginale nella costruzione attiva del sapere geografico (Prezioso, 2017; Pavia, Pasquinelli d'Allegra, Pesaresi, 2017; De Vecchis, Palagiano, 2021; Giarolli, 2023). Queste metodologie, inoltre, tendono a separare rigidamente la Geografia fisica dalla Geografia umana: le lezioni dedicate al clima o alla morfologia non dialogano con elementi economici o socio-culturali; così i processi transcolari che interconnettono gli eventi naturali alle dinamiche sociali restano invisibili nel percorso formativo. Persino laddove venivano introdotti elementi interdisciplinari, come a esempio le letture storiche a integrazione della cartografia, essi erano concepiti più come approfondimenti accessori che come strutture portanti dell'attività educativa (Morri, 2021; De Lucia, Morri, 2025). Dal punto di vista tecnico-operativo è significativo osservare che i metodi tradizionali raramente facevano ricorso a strumenti innovativi già disponibili: le fotografie aeree o gli estratti da riviste geografiche specializzate venivano utilizzati sporadicamente e senza una reale analisi critica (Giorda, Zanolin, 2020). Ciò riflette una concezione dell'immagine geografica come elemento illustrativo piuttosto che dispositivo conoscitivo autonomo. In assenza di pratiche interpretative sistematiche, il linguaggio iconico non svolgeva funzione attiva nella didattica; il materiale visivo restava confinato alla semplice

conferma della narrazione testuale fornita dall'insegnante. Un'altra caratteristica riguardava la scarsa attenzione alle esperienze dirette degli studenti; la connessione tra conoscenza geografica e vissuto quotidiano veniva sottovalutata, se non del tutto ignorata; si tendeva a considerare la disciplina come oggetto auto-referenziale e chiuso rispetto alle emozioni o memorie legate ai luoghi frequentati dagli studenti.

Questi aspetti meno tangibili ma profondamente influenti sulla motivazione all'apprendimento erano ritenuti marginali, mentre oggi sappiamo quanto siano rilevanti nella percezione dello spazio e nella costruzione delle acquisizioni geografiche (Puttilli, Santangelo, 2018; Cfr. anche Giunti scuola). Una tale impostazione si oppone ai principi indicati dalla Geografia della percezione, secondo cui l'immaginario individuale dell'ambiente condiziona direttamente l'interpretazione dei fenomeni territoriali. Sul piano normativo-pedagogico tradizionale emerge quindi un modello basato sulla centralità frontale del docente, su materiali standardizzati omogenei per tutto il gruppo classe e valutazioni fondate essenzialmente su prove mnemoniche o applicazioni elementari delle nozioni apprese; anche la variabilità spaziale dei fenomeni restava affermazione teorica priva di verifica operativa (Calvani, 2014). Vale inoltre considerare che mentre i paradigmi più recenti attribuiscono grande importanza alla multiscalarità e alla transcalarità operativa per collegare micro-fenomeni locali a sistemi globali (*glocal analysis*), nei metodi tradizionali questo passaggio era raramente compiuto: gli esempi discendevano sempre dall'alto verso il basso (top-down), presentando casi internazionali esemplari senza mai problematizzare la relazione concreta con il territorio vissuto dallo studente (Dematteis, 2015; Nuove Indicazioni Nazionali 2025; Castoldi et al., 2025). Se dunque tali metodi hanno avuto il merito storico di consolidare un patrimonio comune di alfabetizzazione cartografica e geografica in termini anche di terminologia e iconografia specifica, sul piano critico rimane evidente una loro incapacità strutturale nel dotare gli studenti degli strumenti interpretativi adeguati a leggere processi spaziali complessi o mutamenti rapidi dei sistemi territoriali. In assenza di pratiche costruttive partecipative, l'esperienza geografica scolastica tradizionale tendeva a cristallizzarsi in un archivio statico di

informazioni piuttosto che funzionare quale laboratorio dinamico per l'analisi critica dello spazio (Schmidt di Friedberg, 2012; Estes, Hortas, Mendes, 2018).

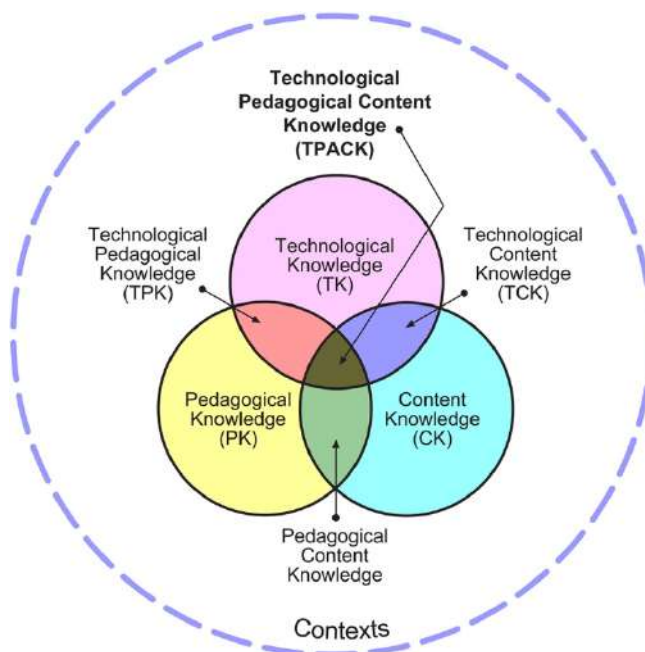


Figura 1. Framework TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge). Il modello visualizza l'intersezione necessaria tra Conoscenza dei Contenuti (Geografia), Conoscenza Pedagogica (metodi attivi) e Conoscenza Tecnologica (GIS, AR/VR). L'area centrale rappresenta l'approccio didattico integrato descritto nel testo, che supera la frammentazione disciplinare dei metodi tradizionali. Elaborazione da Mishra e Koehler, 2006¹¹.

A differenza dei metodi storici basati esclusivamente su testi e cartografie fisse, l'odierno orientamento pedagogico della disciplina propone ambienti di apprendimento dinamici che sfruttano le potenzialità delle tecnologie digitali per permettere un'interazione diretta con i dati geografici (Figura 1) (Doering et al. 2014; Huh, Jo, 2023); ciò favorisce una percezione dello spazio come sistema aperto e complesso, suscettibile di essere esplorato criticamente attraverso fonti multiple. In questo senso l'utilizzo di strumenti digitali quali software di

¹¹ Il modello TPACK è stato teorizzato per descrivere le competenze essenziali dei docenti nell'era digitale. Cfr. Mishra, P., Koehler, M. J. (2006). *Technological Pedagogical Content Knowledge: A framework for teacher knowledge*. Nel contesto geografico, il modello evidenzia come la tecnologia non debba essere un'aggiunta accessoria, ma uno strumento che riconfigura il modo stesso in cui i concetti spaziali vengono insegnati e appresi.

simulazione geografica, piattaforme GIS open-source e ambienti immersivi (AR e VR) assume una valenza non soltanto strumentale ma epistemica (Basílio et al., 2020; Ladeira, 2022): essi consentono esperimenti cognitivi situati, in cui lo studente acquisisce competenze scientifiche mediante la manipolazione di scenari virtuali basati su dati georeferenziati validati (Pesaresi, 2017; De Vecchis, Pesaresi, 2024; Zanolin, Gilardi, De Lucia, 2017; Çöltekin et al. 2020). La Realtà Aumentata (AR), a esempio, permette di sovrapporre elementi informativi al contesto reale vissuto dagli studenti, riducendo il divario tra osservazione diretta e modelli teorici; tale modalità opera una saldatura fra esperienza concreta del territorio e analisi concettuale, rafforzando il nesso interpretativo che nei metodi tradizionali risultava debole. Va tuttavia considerato il rischio di confondere la fedeltà visiva dello scenario simulato con l'affidabilità scientifica dei dati sottostanti: ciò impone un controllo rigoroso delle fonti e una competenza critica specifica da sviluppare nell'ambito formativo (Kerski, 2008). Metodologie didattiche come *l'Outdoor education*¹² (Giorda, Rosmo, 2021; Farné, Agostini, 2014; Estes, Hortas, Mendes, 2018; Dematteis, Giorda, 2013) rappresenta un ulteriore elemento qualificante: essa si fonda sulla convinzione che lo spazio vissuto costituisca un laboratorio privilegiato per sperimentare meccanismi spaziali appresi in teoria. L'attività sul campo viene concepita non come semplice ricognizione descrittiva ma come processo investigativo interattivo: rilevamenti diretti integrati con dati cartografici digitali e immagini satellitari facilitano la comprensione dei fenomeni, permettendo di osservare localmente gli effetti di processi globali; in tal modo si tenta di superare quella separazione artificiale tra Geografia fisica e umana evidenziata nel paragrafo precedente, restituendo agli studenti un quadro sistemico delle interazioni tra fattori naturali e antropici. Un capitolo importante delle innovazioni è dato dal ricorso a metodologie narrative visual-digitali come

¹² Non si tratta della semplice "gita scolastica". È un approccio pedagogico strutturato (molto diffuso nel Nord Europa) che prevede che l'ambiente esterno sia l'aula principale. In Geografia, questo trasforma l'osservazione passiva in *fieldwork* (lavoro sul campo) attivo, essenziale per comprendere il concetto di "paesaggio" come sistema vivente e non come cartolina.

le *StoryMap*¹³ (Lucidi, Pesaresi, 2023); queste combinano cartografia interattiva e storytelling multimediale per narrare processi territoriali complessi (Caquard, 2013; Kerski, 2015). La loro efficacia deriva dalla capacità di intrecciare sequenze geo-referenziate con contenuti audiovisivi e testuali che esplicitano connessioni causali tra fenomeni disparati, climatici, demografici, economici, rispettando al contempo la specificità scalare delle analisi. In ambito scolastico, tale tecnica rafforza le abilità critiche degli studenti nel selezionare informazioni pertinenti e nel comprenderne la collocazione spaziale. Anche giochi educativi digitali con livelli progressivi di difficoltà possono migliorare l'apprendimento geografico: il caso del GeoAR destinato alle scuole medie dimostra come le modalità ludiche possano stimolare il riconoscimento accurato di contenuti geografici specifici sfruttando la memoria visiva associativa (Di Gioia, 2023). Dal punto di vista metodologico, queste innovazioni richiedono un ripensamento del ruolo docente-discente; il docente non è più unico detentore dell'*expertise* ma facilitatore che guida l'esplorazione critica dello spazio; lo studente diventa attore attivo nella costruzione del proprio sapere geografico, capace di raccogliere dati da più fonti (cartografiche tradizionali, geo-visualizzatori online) e confrontarli per trarre inferenze argomentate (LA Foresta, 2025). Questo ribaltamento nella gerarchia cognitiva risulta coerente con i principi dell'*Universal Design for Learning*¹⁴ applicati alla Geografia: diversificare i modelli comunicativi per includere linguaggi verbali, grafici – immediatamente percettivi – consente una partecipazione effettiva anche a discenti con differenti *background* formativi (Gallinelli, Malatesta 2018). La recente letteratura didattico-pedagogica riflette, inoltre, sull'importanza del pensiero critico nello sviluppo di competenze geografiche avanzate; Hattie ha dimostrato l'efficacia maggiore delle metodologie basate sull'evidenza

¹³ Sébastien Caquard è uno dei massimi teorici della “svolta narrativa” nella cartografia. Le StoryMaps (spesso realizzate con software ESRI e solo recentemente affiancati da soluzioni *open-source*) permettono di raccontare storie spaziali. Questo è cruciale didatticamente perché reintroduce la dimensione *temporale* ed *emotiva* che la mappa statica tradizionale aveva eliminato (Bettoni, 2022).

¹⁴ Un *framework* educativo che mira a migliorare e ottimizzare l'insegnamento e l'apprendimento per tutte le persone basandosi su intuizioni scientifiche su come gli esseri umani apprendono. In geografia, significa fornire mappe tattili, audio-descrizioni dei luoghi e modelli 3D, non solo per gli studenti con disabilità, ma per potenziare l'apprendimento di tutti attraverso canali multisensoriali.

empirica e sull'interconnessione multiscala rispetto agli approcci statico-descrittivi (Hattie, 2009). Ciò implica che l'innovazione didattica debba includere valutazioni comparative fra diverse tecniche per verificarne la validità contestuale; ad esempio, cicli iterativi tra esperimenti simulativi in AR (a esempio nello studio di modelli urbanistici) e osservazioni dirette sul campo permettono non solo una verifica *de visu* ma anche ipotesi predittive calibrate sulle peculiarità locali. Un aspetto critico riguarda la gestione del patrimonio informativo multimodale generato da queste attività. La pluralità delle fonti, necessita di procedure standardizzate per essere organizzata ed elaborata senza perdita della coerenza semantica originaria. Integrando strategie derivate dall'analisi statistica spaziale si può evitare il rischio interpretativo della dispersione informativa; ciò richiede però competenze interdisciplinari che travalicano il confine strettamente geografico (Kitchin, 2014; Gryl, Jekel, 2012). Ulteriore questione che emerge riguarda l'accessibilità tecnologica: molti strumenti innovativi comportano costi non trascurabili o richiedono infrastrutture digitali avanzate che non sempre sono implementabili nei contesti di formazione formali e informali. Questa prospettiva etico-pedagogica riconosce alla pratica educativa geografica una funzione inclusiva oltre che formativa, contribuendo a strutturare cittadini dotati degli strumenti cognitivi indispensabili per agire responsabilmente nello spazio sociale ed ambientale condiviso.

1.4 La necessità di nuovi approcci didattici: un *Corpus degli apprendimenti geografici complessi*

L'insegnamento della Geografia all'interno del sistema scolastico italiano, analizzato nella sua evoluzione storica e nella sua attuale configurazione normativa, rivela una profonda crisi d'identità. Questa crisi non è semplicemente riconducibile a una marginalizzazione oraria o a una carenza di risorse, ma affonda le sue radici in quella che può essere definita una «frizione epistemologica» paralizzante. Da un lato, vi è la Geografia accademica e scientifica, che nel corso del XX e XXI secolo ha compiuto una transizione radicale: nata come scienza

idiografica, volta alla descrizione del particolare e alla catalogazione degli elementi visibili del paesaggio, essa è evoluta prima in scienza nomotetica (alla ricerca di leggi generali) e infine in scienza della complessità sistemica (Bernardi, Poli, 2011).

Dall'altro lato, la trasposizione didattica della disciplina – ovvero quel delicato processo di trasformazione del «sapere sapiente» in «sapere insegnato» – sembra essersi cristallizzata in forme obsolete; si osserva una dicotomia strutturale tra la linearità sequenziale dei programmi curriculari e la natura intrinsecamente reticolare dei fenomeni studiati. I manuali scolastici e le pratiche d'aula tendono ancora a parcellizzare il sapere in compartimenti stagni: la litosfera, l'idrosfera, la popolazione, l'economia. Questa frammentazione tassonomica, pur utile per fini organizzativi, tradisce la realtà ontologica del territorio, che è per sua natura un ibrido in cui le sfere fisiche e antropiche si compenetrano incessantemente.

Questa scollatura genera una forma di “riduzionismo didattico” che semplifica il reale fino a svuotarlo di senso: lo studente si trova a memorizzare nomi e dati statistici slegati dalle dinamiche processuali che li hanno generati, percependo la geografia come una materia mnemonica e inerte, piuttosto che come una chiave di lettura indispensabile per decodificare la complessità del presente. La necessità di nuovi approcci didattici, pertanto, non nasce da una mera esigenza di aggiornamento tecnologico o di “digitalizzazione” superficiale, ma dall'urgenza di colmare il divario tra la complessità ontologica del mondo e la limitata capacità di decodifica offerta dagli strumenti tradizionali (Bernardi, 2002-b).

In questo scenario, emerge l'imperativo teorico e operativo di rifondare lo statuto degli oggetti di apprendimento. La ricerca qui presentata propone l'identificazione, l'isolamento e la sistematizzazione di un «*Corpus degli apprendimenti geografici complessi*»¹⁵; con tale

¹⁵ La formalizzazione e la validazione di tale *Corpus* non costituiscono una mera premessa tassonomica, bensì rappresentano uno degli interrogativi di ricerca cardine (*Research Question*) del presente lavoro di tesi. È necessario sottolineare come, allo stato attuale dell'arte, si riscontri una significativa lacuna euristica nel contesto didattico e accademico italiano: mentre la letteratura anglosassone ha ampiamente teorizzato la natura dei *Threshold Concepts* in ambito geografico, non esiste ad oggi, nel panorama nazionale, un tentativo sistematico di declinare tale framework teorico in una matrice operativa specifica per i curricula italiani. Manca, in altri termini, uno strumento validato che isoli e cataloghi gli apprendimenti geografici non in base alla loro

locuzione si intende definire una matrice di nodi concettuali e tematici che non rappresentano semplicemente degli argomenti “difficili”, ma costituiscono delle vere e proprie “soglie” critiche nel processo cognitivo. Facendo riferimento alla letteratura internazionale sui *Threshold Concepts* (concetti soglia) (Meyer, Land, 2003; Healey, 2012), sviluppata originariamente da Meyer e Land, si postula l’esistenza di concetti che possiedono una natura trasformativa. Una volta compresi, questi concetti modificano in modo irreversibile la visione del mondo del discente, permettendogli di percepire connessioni precedentemente invisibili. Tuttavia, la loro acquisizione è spesso problematica: essi sono contro-intuitivi, spesso in conflitto con il senso comune, e richiedono un livello di astrazione che può generare un sovraccarico cognitivo o la formazione di misconcezioni resistenti se non adeguatamente mediati.

L’analisi condotta sulle Indicazioni Nazionali del 2012 – aggiornate nel 2025 – e sulle Linee Guida per le scuole secondarie ha permesso di elaborare questo *Corpus* definendo tre macro-aree di criticità epistemologica:

1. l’area fisico-matematica, legata all’astrazione dello spazio-tempo;
2. l’area sistemico-ambientale, legata all’invisibilità dei processi;
3. l’area socio-economica, legata alla deterritorializzazione e alla transcalarità dei fenomeni geografici.

La domanda di ricerca elaborata a partire dalle esperienze d’insegnamento in contesti reali, propone di esplorare in profondità ciascuna di queste aree, analizzando le ragioni cognitive ed epistemologiche che rendono questi concetti degli ostacoli all’apprendimento, e di

collocazione tematica (es. “idrografia”, “demografia”), ma in funzione della loro complessità epistemologica e del carico cognitivo richiesto per la loro decodifica. La presente ricerca intende colmare tale vuoto, proponendo il *Corpus* come primo modello di sistematizzazione delle “soglie” cognitive specifiche per l’insegnamento della geografia nella scuola italiana, fornendo così una base empirica per la progettazione di interventi didattici mirati e tecnologicamente aumentati.

presentare un modello metodologico originale, il G-CAM (*Geographic Criticality Assessment Model*), per la misurazione e la gestione di tali criticità.

Il concetto di *Threshold Concept* rappresenta una lente analitica fondamentale per comprendere perché certi argomenti geografici risultino ostici per la maggioranza degli studenti. A differenza dei «concetti nucleari (core concepts)», che costituiscono il substrato conoscitivo della disciplina, i concetti soglia sono paragonabili a portali: attraversarli apre una nuova prospettiva, ma restare sulla soglia significa rimanere bloccati in una comprensione superficiale o mimetica; le caratteristiche distintive di questi concetti nel contesto geografico sono:

- Trasformatività. La comprensione della tettonica a placche, ad esempio, trasforma la percezione di una montagna da elemento statico e immutabile a struttura dinamica e transitoria. Il paesaggio non è più visto come uno sfondo, ma come un processo in atto.
- Irreversibilità. Una volta acquisita la visione sistemica del clima, è difficile “disimpararla” e tornare a vedere i fenomeni meteorologici come eventi isolati e casuali.
- Integratività. I concetti soglia permettono di collegare ambiti apparentemente distanti. Il concetto di “scala”, ad esempio, permette di integrare la biografia di un migrante con le dinamiche della globalizzazione economica.
- Natura Contro-intuitiva (*Troublesome Knowledge*). Questa è la caratteristica più critica per la didattica. La geografia scientifica spesso contraddice l’esperienza fenomenica quotidiana. I sensi ci dicono che la Terra è ferma e piatta (localmente), mentre la geografia ci chiede di immaginarla come una sfera rotante. Questo conflitto tra «geografia della percezione» e «geografia scientifica» è il cuore della criticità epistemologica.

La ricerca sulla Didattica della Geografia e – più in generale – sulle scienze, parte dall’assunto che gli studenti non sono *tabulae rasae*: essi costruiscono attivamente modelli mentali del mondo fisico e sociale fin dalla prima infanzia che poi tendono ad arricchire durante le

diverse fasi evolutive della formazione. Questi modelli, definiti «teorie ingenuie o *naive theories*»¹⁶ (Gardner, 2011; Vosniadou, 1994), sono funzionali alla vita quotidiana ma spesso epistemologicamente errati. Nel contesto del *Corpus degli apprendimenti geografici complessi* che si è tentato di elaborare e validare, si evidenzia come la didattica tradizionale spesso fallisca perché ignora la resistenza di queste strutture preesistenti; la lezione frontale o il testo scritto si depositano sopra le misconcezioni senza scardinarle. Uno studente, a esempio, può memorizzare la definizione di moto di rivoluzione, ma continuare a credere implicitamente che l'inverno sia causato dalla maggiore distanza della Terra dal Sole, perché questa spiegazione è più coerente con la sua esperienza intuitiva sulle fonti di calore (più mi allontano, più fa freddo). Il *Corpus* cerca di identificare, quindi, le aree dove questa frizione è massima e dove è necessario un intervento didattico che non sia solo trasmissivo, ma ristrutturante, capace cioè di provocare un conflitto cognitivo e facilitare la modificazione concettuale (*Conceptual Change*)¹⁷ (Mason, 2006).

L'elaborazione del *Corpus* ha permesso di mappare il territorio della complessità geografica scolastica, individuando tre nodi problematici principali. La prima macro-area riguarda le fondamenta geometriche e fisiche della disciplina. Qui la geografia richiede un'uscita radicale dal sistema di riferimento egocentrico. L'insegnamento dei moti della Terra e delle

¹⁶ Il costrutto di «teoria ingenua» (o *misconception* nella letteratura anglosassone sul *Conceptual Change*) indica quel sistema di spiegazioni intuitive che il soggetto elabora spontaneamente per interpretare la realtà fisica e spaziale prima di — o parallelamente a — l'istruzione formale. Come evidenziato da Gardner, tali modelli mentali possiedono una formidabile resistenza al cambiamento poiché, pur essendo epistemologicamente fallaci rispetto ai canoni scientifici (si pensi alla percezione intuitiva della “terra piatta” basata sull'orizzonte visibile), risultano pragmaticamente efficaci e coerenti per gestire le interazioni quotidiane con l'ambiente, creando una dicotomia cognitiva tra il “sapere scolastico” e il “sapere reale” che la didattica deve necessariamente decostruire.

¹⁷ Il paradigma del *Conceptual Change*, sviluppatosi originariamente nell'ambito della *Science Education*, postula che l'apprendimento di concetti complessi non avvenga per semplice accumulo lineare di informazioni (assimilazione), bensì richieda una radicale ristrutturazione delle reti semantiche preesistenti (accomodamento). Secondo il modello classico teorizzato da Posner et al., affinché tale “salto” ontologico avvenga, è necessario che il soggetto sperimenti una profonda insoddisfazione verso le proprie concezioni intuitive, rivelatesi inadeguate a spiegare un'anomalia o un problema, e che percepisca la nuova teoria scientifica come intellegibile, plausibile e maggiormente fruttuosa (*fruitful*) sul piano euristico. In assenza di questo conflitto cognitivo intenzionale, le nuove conoscenze rischiano di essere semplicemente giustapposte a quelle errate, generando ibridi concettuali instabili.

stagioni rappresenta, secondo i dati raccolti, uno dei punti di maggior criticità nelle scuole secondarie di primo e secondo grado; la difficoltà non risiede nella complessità matematica dei moti in sé, ma nell'operazione di visualizzazione spaziale richiesta. Lo studente deve compiere un salto cognitivo dal riferimento topocentrico (io osservatore sulla Terra) al riferimento eliocentrico (io osservatore esterno nello spazio). Deve, inoltre, gestire una geometria dinamica tridimensionale complessa:

- una sfera che ruota su sé stessa;
- un asse di rotazione inclinato rispetto alla perpendicolare del piano orbitale;
- un moto di traslazione lungo un'ellisse;
- il mantenimento del parallelismo dell'asse (l'asse punta sempre verso la Stella Polare).

La comprensione del meccanismo delle stagioni richiede, quindi, la sintesi simultanea di tutte queste variabili per dedurre l'angolo di incidenza dei raggi solari sulla Terra. La didattica tradizionale si affida, solitamente, a diagrammi 2D statici – spesso tratti dai manuali di geografia in adozione – che appiattiscono questa complessità; questi mediatori, invece che facilitare, spesso inducono all'errore: i disegni prospettici dell'orbita (rappresentata quasi sempre come un'ellisse molto schiacciata per ragioni grafiche) rafforzano l'idea errata che la distanza Terra-Sole vari drasticamente durante l'anno. Si tratta di una «dissonanza cognitiva 3D/2D» in cui lo strumento didattico è ontologicamente inadeguato all'oggetto di studio. Un altro ostacolo fondamentale è rappresentato dalla carta geografica stessa. Sebbene sia lo strumento ubiquo della geografia, la sua natura matematica è raramente compresa. Il passaggio dal geoide al piano comporta inevitabilmente una deformazione. Il *Corpus* evidenzia la criticità «dell'astrazione topologica». Gli studenti tendono a reificare la mappa, considerandola una fotografia oggettiva della realtà. La persistenza della proiezione di Mercatore (cilindrica isogona) nei manuali e nelle app di navigazione radica distorsioni cognitive profonde sulle dimensioni relative dei continenti (il cosiddetto «*Mercator bias*», che

sovradimensiona l'emisfero nord a discapito delle aree equatoriali). Comprendere la carta significa comprendere la «menzogna geometrica» necessaria alla sua costruzione; significa accettare che ogni rappresentazione è una scelta selettiva che sacrifica alcune proprietà metriche (equidistanza, equivalenza o isogonia) per preservarne altre. Senza questa consapevolezza critica, la geografia diventa un veicolo inconsapevole di visioni eurocentriche o distorte del mondo. Il terzo elemento di questa macro-area riguarda la geologia e la tettonica a placche. Qui la criticità è temporale: «l'incommensurabilità temporale». La mente umana si è evoluta per gestire scale temporali brevi (ore, anni, generazioni). Il tempo geologico, fatto di milioni di anni, è un'astrazione quasi impossibile da concepire intuitivamente. La tettonica a placche richiede di vedere la litosfera come un fluido in movimento, le montagne come strutture effimere, gli oceani come bacini che si aprono e chiudono. La percezione sensoriale ci dice che la terra sotto i piedi è ferma; la scienza ci dice che corre. Questo conflitto tra percezione statica e realtà dinamica crea un ostacolo epistemologico che rende difficile l'apprendimento profondo dei rischi sismici e vulcanici, spesso ridotti a eventi catastrofici puntuali anziché essere compresi come manifestazioni normali della fisiologia planetaria.

La seconda macro-area affronta la sfida di insegnare ciò che non si vede, a esempio i sistemi fluidi e le interconnessioni ecologiche. Per comprendere i climi, lo studente deve costruire un modello mentale della costruzione e circolazione generale dell'atmosfera; questo implica visualizzare celle convettive tridimensionali che avvolgono il pianeta. Ancor più complesso è il concetto, a esempio, di Forza di Coriolis, una forza apparente dovuta alla rotazione terrestre che devia le traiettorie dei fluidi; spiegare tale fenomeno con diagrammi statici risulta essere abbastanza inefficace e porta a un apprendimento mnemonico (dall'analisi dei dati sulle acquisizioni didattiche rispetto a questo contenuto geografico, la risposta media risulta essere «devia a destra nell'emisfero nord») privo di comprensione fisica. La criticità qui è l'invisibilità dei fluidi: lo studente deve immaginare masse d'aria che salgono, scendono, si espandono e ruotano, interagendo con la rotazione planetaria, senza avere alcun riscontro

visivo diretto nella sua esperienza quotidiana. Discorso affine riguarda gli argomenti che interessano il *Climate Change*, che risulta una delle sfide educative in termini geografici del nostro tempo. Nel *Corpus* elaborato, esso è classificato come critico a causa della «dislocazione causale» e della natura non lineare dei *feedback loops* (Meadows, 2008). Il cambiamento climatico è un «iper-oggetto» (Morton, 2013) della Didattica della Geografia: è ovunque e in nessun luogo specifico, esteso nel tempo e nello spazio. La mente umana fatica a connettere un'azione micro-locale invisibile (accendere un motore a combustione) con un effetto macro-globale differito di decenni (l'innalzamento del livello del mare); inoltre, il sistema climatico non risponde in modo lineare alle sollecitazioni esterne e antropiche: esistono soglie di non ritorno (*tipping points*) e meccanismi di retroazione¹⁸. La didattica tradizionale, abituata a sequenze causa-effetto lineari e immediate, fatica a trasmettere questa complessità sistemica, lasciando gli studenti con un senso di ansia o di scetticismo¹⁹, ma senza una vera comprensione dei meccanismi (Bernardi, Poli, 2011; Hickman, et al. 2021).

La terza macro-area riguarda la geografia umana, economica e politica, dove la materia stessa di studio è diventata «liquida» (Bauman, 2011). L'economia contemporanea ha subito un processo di “deterritorializzazione”. I flussi finanziari, le reti di informazioni e le catene del valore globali non hanno una sede fisica univoca. Mappare la globalizzazione significa mappare l'invisibile: flussi di bit che spostano capitali in millisecondi. La didattica, ancora legata a carte economiche che mostrano le risorse minerarie o le aree industriali (i luoghi),

¹⁸ un esempio è l'albedo dei ghiacci: meno ghiaccio è presente, più calore viene assorbito, quindi ancora meno ghiaccio ci sarà

¹⁹ L'incapacità di decodificare la complessità sistemica attraverso gli strumenti cognitivi tradizionali non genera solo un deficit di comprensione, ma precipita in specifiche forme di disagio psicologico ormai codificate dalla letteratura clinica e pedagogica. I dati raccolti da un vasto studio internazionale condotto da Hickman et al. (2021) su un campione di 10.000 giovani, evidenziano come il 59% degli intervistati si dichiari «estremamente preoccupato» per il cambiamento climatico e oltre il 45% riferisca che tale sentimento impatta negativamente sulla vita quotidiana. Tale condizione, definita «eco-ansia», è spesso aggravata da una didattica che, presentando i fenomeni secondo sequenze lineari di causa-effetto (emissione-riscaldamento-catastrofe) prive di prospettive di mitigazione sistemica, induce una percezione di inevitabilità e fatalismo. In assenza di un pensiero complesso capace di individuare leve di intervento nella rete delle retroazioni, lo studente scivola nell'«impotenza appresa» (*learned helplessness*) o, per reazione difensiva, nello scetticismo e nella negazione del problema per ridurre la dissonanza cognitiva (Hickman, et al. 2021; Ojala, 2012).

fatica a rappresentare lo «spazio dei flussi» (Castells, 2014). La difficoltà per lo studente è l'astrazione: comprendere come decisioni prese in una borsa valori possano determinare la chiusura di una fabbrica locale (Farinelli, 2003). Manca una “topologia delle reti” che integri la topografia classica. L'indagine demo-geografica, per sua natura, non può prescindere dall'attivazione di una competenza ermeneutica complessa: la transcalarità. Tale necessità epistemologica trova la sua declinazione paradigmatica nell'analisi dei fenomeni migratori, i quali non si manifestano come eventi statici, bensì come processi fluidi che attraversano e interconnettono simultaneamente diverse dimensioni spaziali. Lo sguardo del ricercatore è dunque chiamato a compiere un movimento focale continuo, una dialettica che oscilla tra tre livelli di osservazione. In prima istanza, l'analisi si pone sulla scala micro, il livello della prossimità e dell'individuo. Qui la Geografia si fa intima, indagando la storia di vita, la soggettività delle motivazioni psicologiche e l'architettura del progetto migratorio. È la dimensione in cui lo spazio è vissuto e percepito, dove l'*agency* del singolo attore sociale plasma il movimento iniziale. Allargando l'orizzonte, si incontra la scala meso, ovvero la dimensione regionale e nazionale. È questo il teatro delle politiche di *governance* territoriale, dove si tracciano le rotte di transito e si materializzano le frizioni confinarie. A questo livello, l'attenzione si sposta sulle infrastrutture dell'accoglienza, sull'impatto demografico locale e sulla gestione amministrativa dei flussi, osservando come lo spazio venga normato e organizzato istituzionalmente. Infine, lo sguardo deve elevarsi alla scala macro, abbracciando la dimensione globale. Qui operano le grandi forze strutturali: le asimmetrie del sistema economico-mondo, le tensioni geopolitiche e le alterazioni climatiche che agiscono come *push factors* determinanti. È la scala delle interdipendenze planetarie, dove le cause profonde dei dislocamenti umani si rivelano nella loro interezza sistemica. La criticità pedagogica, in questo caso, risiede proprio nella difficoltà di mantenere una coesione organica tra questi piani. Frequentemente, la didattica tende a cristallizzarsi su un unico livello — sovente quello meso, focalizzandosi sulla fenomenologia dell'emergenza o della “crisi degli sbarchi” — operando una cesura che oscura tanto le macro-determinanti strutturali quanto la dimensione

biografica umana. In tal senso, il *Corpus* identifica nello *scale jumping* — inteso come l’agilità intellettuale di transitare fluidamente tra i diversi ordini di grandezza spaziale senza perdere la visione d’insieme — una *competenza soglia* ineludibile per la costruzione di conoscenze e competenze geografiche consapevoli e strutturate.

La tabella di seguito sintetizza la struttura del *Corpus* elaborato per gradi di scuola secondaria, comprensivo delle barriere cognitive di riferimento.

Tabella 1. Sintesi *Corpus* degli apprendimenti geografici complessi e criticità epistemologiche

Macro-Area Sematica	Se- gno	Oggetto Spe- cifico del Cor- pus	Ostacolo Epistemologico (la criti- cità)	Target Scolastico Prioritario
Spazio- Temporale (Fisico- Matematico)		Moti della Terra e Sta- gioni	Dissonanza Cognitiva 3D/2D: Difficoltà nel visualizzare oggetti sferici in movimento e inclinati su un piano orbitale, correlando l’angolo di incidenza solare con il clima.	Scuola Sec. di I grado (Classe III) Scuola Sec. di II grado (Classe I)
		Proiezioni e Deformazioni	Astrazione Topologica: Incomprensione della natura matematica della carta; persistenza di bias cognitivi sulle dimensioni e forme dei continenti (bias Mercatore).	Scuola Sec. di I grado (Classe I) Scuola Sec. di II grado (Biennio)
		Tettonica e Tempo Pro- fondo	Incommensurabilità Temporale: Incapacità di percepire la dinamicità della litosfera su scale geologiche (<i>Deep Time</i>); percezione statica del rilievo.	Scuola Sec. di I grado (Classe III) Scuola Sec. di II grado (Classe I)
Sistemico-Am- bientale (Invisi- bile)		Circolazione Atmosferica	Invisibilità dei Fluidi: Difficoltà nel modellizzare mentalmente sistemi convettivi invisibili e forze rotazionali (Coriolis) a partire da schemi statici 2D.	Scuola Sec. di II grado (Classe I)
		Cambiamento Climatico	Dislocazione Causale: Difficoltà nel connettere cause locali invisibili a effetti globali differiti; incomprensione dei meccanismi di retroazione (<i>feedback loops</i>).	Trasversale (Educazione Civica)
Socio-Economico (Immateriale)		Globalizza- zione Finan- ziaria	Deterritorializzazione: Difficoltà nel mappare flussi immateriali e reti di potere che non hanno una sede fisica univoca; astrazione dei mercati.	Scuola Sec. di II grado (Triennio)

Migrazioni e Demografia	Transcalarità: Difficoltà nel gestire simultaneamente le scale micro (individuale), meso (regionale) e macro (globale) per interpretare i flussi.	Scuola Sec. di I grado (Classe III) Scuola Sec. di II grado (Biennio/Triennio)
-------------------------	--	--

1.5 Metodologia di elaborazione del *Corpus degli apprendimenti geografici complessi*: i KPI per la misurazione delle criticità nella fase di insegnamento-apprendimento dei contenuti geografici

La definizione teorica del *Corpus*, per quanto rigorosa, rischierebbe di rimanere un esercizio speculativo se non accompagnata da una metodologia di validazione e misurazione. In un contesto educativo sempre più orientato *all'evidence-based education*, è necessario quantificare la difficoltà didattica per giustificare scelte pedagogiche e investimenti tecnologici. A questo scopo, la ricerca ha sviluppato il modello G-CAM (Geographic Criticality Assessment Model). Questo modello rappresenta un tentativo innovativo di applicare logiche di analisi dei sistemi (tipiche dell'ingegneria o del management) alla didattica, introducendo il concetto di KPI (*Key Performance Indicators*) per la valutazione del “rischio didattico”.

Il G-CAM si prefigge di rispondere alla domanda: *Quanto è difficile insegnare questo specifico argomento con i metodi tradizionali?* E, di conseguenza: *Quanto è necessario un intervento tecnologico innovativo?* Il modello si articola su quattro indicatori fondamentali, ciascuno dei quali indaga una dimensione specifica della resistenza all'apprendimento.

Il primo pilastro è l'Indice di Resistenza Concettuale (IRC). Questo indicatore misura la tenacia delle misconcezioni. Come discusso, gli errori in geografia non sono sempre frutto di distrazione, ma spesso derivano da modelli mentali solidi e coerenti (seppur errati). L'IRC viene calcolato analizzando la persistenza dell'errore tra un test *pre-istruzione* e un test *post-istruzione*. Se, dopo un modulo di lezioni frontali sui moti della Terra, il 60% degli studenti continua a credere che le stagioni dipendano dalla distanza dal Sole, l'IRC è altissimo. Questo indicatore attinge anche ai dati nazionali standardizzati (es. prove INVALSI per le

competenze logico-spaziali), permettendo di identificare quali errori sono “endemici” nella popolazione scolastica. Un alto IRC ($> 40\%$) è il segnale più chiaro che l’approccio verbale/testuale è insufficiente: serve un’esperienza percettiva forte per “rompere” la misconcezione.

Il secondo indicatore, l’Indice di Astrazione Transcalare (IAT), misura la complessità strutturale del fenomeno in termini di scale coinvolte. Lo IAT è un punteggio (score da 1 a 5) assegnato in fase di analisi epistemologica del contenuto.

- Score 1: Fenomeno locale, visibile, descrittivo (es. la morfologia di una collina vicina).
- Score 3: Fenomeno regionale/nazionale che implica relazioni tra centri urbani e territorio.
- Score 5: Fenomeno sistemico globale che connette cause micro a effetti macro (es. filiera agroalimentare globale, cambiamento climatico). Un argomento con IAT > 3 richiede allo studente di manipolare mentalmente diverse mappe a diverse scale contemporaneamente. Questo sovraccarico della memoria di lavoro è spesso causa di insuccesso. Un alto IAT suggerisce la necessità di strumenti che permettano lo zoom continuo (come *Google Earth* o globi virtuali in VR) per rendere fluido il passaggio di scala, evitando la frammentazione cognitiva delle carte statiche.

Il Gap di Visualizzazione (GdV) è l’indicatore che giustifica più direttamente l’uso delle tecnologie immersive. Esso misura la distanza ontologica tra la natura del fenomeno e la natura del mediatore didattico. Il GdV è alto quando si cerca di rappresentare:

- un fenomeno 3D su un supporto 2D;
- un fenomeno dinamico (tempo) su un supporto statico;
- un fenomeno invisibile con simboli astratti. Ad esempio, insegnare la circolazione atmosferica (3D, dinamica, invisibile) con una mappa del libro (2D, statica,

simbolica) genera un GdV massimo. Lo studente deve colmare questo gap con uno sforzo immaginativo enorme. Il GdV quantifica la “cecità indotta” dagli strumenti inadeguati. L’obiettivo delle tecnologie AR/VR è abbattere il GdV, fornendo rappresentazioni che siano omologhe al fenomeno (modelli 3D, animati, che rendono visibile l’invisibile).

Infine, l’Efficienza Temporale Didattica (ETD) introduce una dimensione economica. Il tempo scuola è una risorsa finita e scarsa, specialmente per la geografia. L’ETD è il rapporto tra il tempo investito (ore di spiegazione, studio, recupero) e i risultati ottenuti (voti medi). Un argomento come la geografia astronomica ha spesso una bassa ETD: richiede molte ore di spiegazione, genera frustrazione, richiede recuperi, e alla fine i risultati sono spesso mediocri. Un basso ETD indica che il metodo trasmissivo è inefficiente. L’investimento in tecnologie immersive, pur richiedendo un tempo di setup iniziale, può aumentare drasticamente l’ETD: un’esperienza in VR di 15 minuti sui moti della Terra può chiarire concetti che richiederebbero ore di spiegazione verbale, liberando tempo per il dibattito critico e l’approfondimento

La sintesi di questi indicatori è presentata nella Tabella 2.

Tabella 2. *Key Performance Indicators (KPI) per il Corpus degli Apprendimenti Geografici Complessi. Elaborazione dell'autore.*

Indicatore (KPI)	Definizione Operativa	Metrica di Rilevazione e Fonti	Soglia di Criticità (Allarme Didattico)
IRC - Indice di Resistenza Concettuale	Misura della persistenza di misconcezioni (<i>misconceptions</i>) post-intervento didattico tradizionale.	Rapporto percentuale tra errori nei test <i>post</i> e test <i>pre</i> . Analisi item INVALSI area logico-spaziale.	> 40% di persistenza dell’errore concettuale
IAT - Indice di Astrazione Transcalare	Numero di livelli scalari (locale, regionale, nazionale, globale) implicati simultaneamente nel fenomeno.	Analisi epistemologica del contenuto. Assegnazione Score 1-5 (1=locale/descrittivo; 5=sistemico/globale).	Score > 3 (richiesta di pensiero sistemico multilivello).
GdV - Gap di Visualizzazione	Discrepanza tra la dimensionalità del fenomeno (3D/4D) e il mediatore didattico (1D/2D).	Analisi comparativa manuali scolastici vs realtà fenomenica. Survey docenti su efficacia immagini.	Alta Discrepanza (es. Fenomeno 3D dinamico rappresentato su supporto 2D statico).
ETD - Efficienza	Rapporto tra tempo scuola investito (ore lezione +	Analisi piani di lavoro docenti e registri elettronici (voti medi per modulo tematico).	Basso Rapporto (Alto investimento orario con

Temporale Didattica	recupero) e performance media in verifica.	risultati mediocri/insufficienti).
--------------------------------	--	------------------------------------

Le evidenze scaturite dallo studio culminato nella definizione del *Corpus degli apprendimenti geografici complessi* e nella strutturazione del modello *G-CAM*, viste anche le macro-aree di criticità rilevate, mostrano una verità ineludibile: le aporie dell'apprendimento non possono essere ridotte sbrigativamente a deficit cognitivi o a carenze motivazionali del discente; al contrario, esse si configurano come il prodotto di una frizione strutturale, una dissonanza tra l'ontologia complessa del mondo contemporaneo e l'inadeguatezza epistemologica dei mediatori didattici tradizionali.

La Geografia, considerate le sue specificità e complessità, necessita di strumenti ermeneutici che siano speculari alla sua natura reticolare e dinamica. In questo scenario, le tecnologie immersive – la Realtà Virtuale e Aumentata (AR-VR) – trascendono la loro funzione di orpello tecnologico o di superficiale *gamification*; esse – viceversa – si elevano allo status di autentiche «protesi cognitive», dispositivi indispensabili per operare quali strumenti profondi sui KPI individuati. Tali tecnologie agiscono su tre fronti decisivi: cercano di alleviare il gap di visualizzazione mediante la modellazione tridimensionale dinamica; cercano di ordinare la transcalarità grazie a interfacce di navigazione fluida che permettono continui zoom tra le scale; colmano le resistenze concettuali attraverso i meccanismi dell'*embodied cognition*, permettendo al discente di esperire fisicamente i concetti, superando la sola intellettualizzazione astratta.

2. Quadri normativi e giuridici per l'innovazione tecnologica nella Didattica della Geografia

2.1 La normativa scolastica italiana per l'insegnamento della Geografia: linee guida e nuove indicazioni ministeriali per la scuola secondaria

L'analisi diacronica e critica dell'evoluzione normativa riguardante l'insegnamento della Geografia nel sistema scolastico italiano rivela un percorso accidentato, caratterizzato da una costante tensione dialettica tra istanze di rinnovamento epistemologico e resistenze strutturali, tra spinte verso l'autonomia scolastica e ritorni a forme di centralismo prescrittivo. Per comprendere l'attuale statuto della disciplina, è necessario ripercorrere le tappe fondamentali che hanno segnato il passaggio dai Programmi Ministeriali prescrittivi del Novecento alle più recenti Indicazioni Nazionali, un transito che non è intervenuto soltanto sulla modifica dei contenuti disciplinari, ma soprattutto nella concezione stessa del sapere geografico, sempre più orientato verso la competenza e l'integrazione tecnologica, pur tra contraddizioni irrisolte.

L'evoluzione delle linee guida ministeriali italiane in materia di insegnamento della Geografia riflette, infatti, un progressivo mutamento epistemologico e metodologico che, pur mantenendo la disciplina all'interno di una cornice curricolare storicamente consolidata, ne ha ridefinito finalità e strumenti in relazione sia agli sviluppi scientifici sia alle trasformazioni socioculturali e tecnologiche. Se nella fase antecedente alle più recenti riforme l'impianto normativo privilegiava una trasmissione ordinata di contenuti statici, con una marcata separazione fra Geografia fisica e Geografia umana, con la comparsa sulla scena della normativa scolastica italiana delle Indicazioni nazionali, si è posta maggiore enfasi su una

visione integrata dello spazio come sistema complesso e interconnesso e multiscalare²⁰ (MIUR, 2012; Castoldi et al., 2025). La normativa più recente recepisce tendenze maturate nel dibattito nazionale e internazionale sull'educazione geografica, tra cui il riferimento esplicito alla Carta Internazionale sull'Educazione Geografica del 2016; tale documento sancisce la rilevanza della disciplina per la formazione di cittadini consapevoli e partecipi delle dinamiche globali, attribuendole dignità di sapere scientifico dotato di metodologie proprie ma aperto al dialogo interdisciplinare²¹ (IGU, 2016). La scelta di assumere un quadro di riferimento condiviso a livello internazionale non è soltanto simbolica: essa segna un impegno nel tradurre istanze teoriche – come l'integrazione tra dimensioni ambientali e socio-culturali – in obiettivi curricolari nazionali che richiedono approcci didattici capaci di connettere i fenomeni locali alle reti globali.

Il punto di svolta fondamentale nella normativa scolastica italiana è rappresentato dall'introduzione dell'Autonomia Scolastica (DPR 275/1999), che ha scardinato il modello centralistico dei programmi nazionali uguali per tutti, conferendo alle singole istituzioni scolastiche la responsabilità di progettare percorsi formativi aderenti ai bisogni del territorio. In questo nuovo scenario, la Geografia ha assunto un ruolo potenzialmente strategico come disciplina di raccordo tra la scuola e la realtà locale; tuttavia, come osserva Previtali (in Castoldi et al., 2025), le potenzialità dell'autonomia si sono spesso scontrate con una prassi inerziale e burocratizzata: «senza l'autonomia scolastica e la capacità delle istituzioni scolastiche di progettare e realizzare “interventi di educazione, formazione e istruzione mirati allo sviluppo della persona, adeguati ai diversi contesti”, le “Indicazioni”, per quanto nuove, restano [sostanzialmente] dei vecchi “Programmi”». Questa discrepanza tra la norma e la prassi didattica ha fatto sì che «il Curricolo in molte scuole non è oggetto di ricerca,

²⁰ Si fa riferimento principalmente alle Indicazioni Nazionali del 2012, ma anche quelle riferite ai più recenti aggiornamenti normativi – le Nuove Indicazioni 2025 – ribadiscono la centralità della scala.

²¹ Si fa riferimento alla *International Charter on Geographical Education* adottata dall'Unione Geografica Internazionale (IGU) nel 2016, che stabilisce gli standard globali per l'insegnamento della disciplina geografica.

discussione, partecipazione, condivisione, ma è delegato a un gruppo di lavoro, numericamente sempre più ristretto», depotenziando – di fatto – la portata innovativa della riforma.

Il documento cardine che ha ridefinito l'epistemologia scolastica della disciplina nel primo ciclo d'istruzione è rappresentato dalle *Indicazioni Nazionali per il curricolo della scuola dell'infanzia e del primo ciclo d'istruzione* del 2012 (DM 254/2012); questo testo ha sancito il definitivo superamento dell'approccio nozionistico-descrittivo a favore di una didattica per competenze, allineata con le raccomandazioni europee (Poli, 2011-a). Ancora una volta, e in modo piuttosto esplicito, la Geografia è descritta come la disciplina “di cerniera” per eccellenza, capace di raccordare le scienze naturali con quelle umane e sociali. Tuttavia, la ricezione di queste normative è stata disomogenea e spesso problematica. Fatichenti rileva come la disciplina abbia subito una progressiva erosione, sostenendo che «nel corso degli ultimi decenni, in Italia, l'insegnamento della Geografia nelle scuole ha conosciuto notoriamente una progressiva marginalizzazione: ciò si è verificato soprattutto nella scuola secondaria di secondo grado, mentre la disciplina manifesta ancora segni di relativa resistenza e vitalità nella primaria» (Fatichenti, 2023).

La situazione della Geografia nella scuola Secondaria di Secondo Grado è stata drasticamente compromessa dalla Riforma Gelmini (2008-2010), che ha comportato una sensibile riduzione del monte ore disciplinare negli istituti tecnici e professionali e, fatto ancor più critico, ha introdotto nel biennio dei Licei l'insegnamento ibrido della “Geostoria”. Questa scelta normativa, ampiamente criticata dalla comunità scientifica, ha spesso ridotto la Geografia ad ancella della storia; Fatichenti (2023) denuncia con forza questa evoluzione, sottolineando come la penalizzazione sia consistita «essenzialmente nell'accorpamento orario con la Storia nel primo biennio dei Licei e, negli Istituti Tecnici, nella purtroppo frequente assegnazione delle ore di Geografia (classe di concorso A/021) a docenti di classi di concorso ritenute affini (per es. Scienze o Materie letterarie)». Tale assetto ha generato una didattica spesso affidata a docenti privi di una formazione specifica e aggiornata sulle metodologie e sulle tecnologie geospaziali, con la conseguenza che «la geografia paga

costantemente il danno di un'immagine non adeguata, ancora, legata a un impianto prevalentemente mnemonico e nozionistico» (Bernardi, 2002; Sarno, Siniscalchi, 2008; Poli, 2011).

Il panorama normativo è attualmente in una fase di profonda revisione, con la stesura delle Nuove Indicazioni Nazionali, la cui entrata in vigore è prevista per l'anno scolastico 2026/2027. Questo documento programmatico segna un'ulteriore evoluzione, introducendo elementi di discontinuità che meritano un'analisi approfondita. Secondo le anticipazioni contenute nella Guida alle Nuove Indicazioni (Castoldi et al., 2025), il testo ministeriale sembra operare un deciso «ritorno ai contenuti», riaffermando la centralità delle conoscenze disciplinari come prerequisito indispensabile per lo sviluppo delle competenze. Magni (in Castoldi et al., 2025) è convinto che «cercare di insegnare competenze cognitive in assenza di conoscenze vere e proprie è un sicuro passaporto verso l'ignoranza», criticando la contrapposizione tra una presunta «scuola delle competenze» e una «scuola delle conoscenze». Per la Geografia, le Nuove Indicazioni ribadiscono il ruolo centrale della disciplina nella comprensione della complessità, ma introducono una strutturazione più rigida e prescrittiva dei contenuti, in base al principio guida del *non multa, sed multum*; si legge nel testo delle Indicazioni Nazionali del 2012 che «dilatare a dismisura la quantità di conoscenze da insegnare diluisce, infatti, la sostanza di quanto i discenti possono apprendere: occorre dunque scegliere conoscenze rilevanti (sul piano culturale), significative (sul piano scientifico), essenziali (sul piano formativo)» (MIUR, 2012; De Vecchis, Pasquinelli d'Allegra, Pesaresi, 2020). Viene sottolineata, entrando nello specifico, l'importanza di una visione transcalare che permetta agli studenti di connettere i fenomeni locali alle dinamiche planetarie. Questo approccio risponde all'esigenza di fornire chiavi di lettura per le grandi sfide contemporanee, come il cambiamento climatico e le migrazioni, che richiedono la capacità di «saltare di scala» e di analizzare le interdipendenze sistemiche.

Un elemento di novità rilevante, che ha suscitato dibattito, è la reintroduzione della figura del docente come *magister*. Il testo afferma che «un insegnante è *magis* (da cui *magister*)

“di più”, e che può essere volano del desiderio di apprendere di uno studente. Come tale, egli può diventare un punto di riferimento essenziale del percorso di formazione dello studente». Questa visione mira a recuperare l'autorevolezza della figura docente, contrastando «pedagogie facilitatrici» che rischiano di «rendere deboli i saperi anziché forti gli studenti». Tuttavia, permane il rischio che l'elencazione dettagliata di conoscenze possa essere interpretata come un ritorno ai vecchi programmi, limitando l'autonomia progettuale delle scuole se non accompagnata da un'adeguata formazione docente.

L'evoluzione normativa della Geografia, inoltre, non può essere letta isolatamente dal quadro europeo delle competenze chiave per l'apprendimento permanente (Raccomandazione del Consiglio UE del 22 maggio 2018); contribuisce in modo sostanziale a diverse competenze chiave, come evidenziato da Fatichenti: «la stessa Raccomandazione, nel descrivere tali competenze, non nomina la Geografia, ma è stato opportunamente sottolineato che la disciplina è di fatto presente in ciascuna di esse» (Ivi.). In particolare, il nesso tra Geografia e cittadinanza è stato rafforzato dalla Legge 92/2019, che ha reintrodotto l'insegnamento trasversale dell'Educazione Civica; le Linee Guida per l'Educazione Civica individuano tre nuclei concettuali: Costituzione, Sviluppo Sostenibile e Cittadinanza Digitale. Qui, la Geografia è esplicitamente richiamata come disciplina cardine per il secondo nucleo; ancora Fatichenti osserva che «la Geografia fornisce il contesto in cui si svolge l'Educazione civica: per esempio, aiuta gli studenti a comprendere i paesaggi fisici e culturali in cui essi vivono e i modi in cui questi paesaggi sono modellati dalle azioni umane» (Ivi.). In questo quadro, la normativa impone alla geografia di farsi carico dell'educazione alla sostenibilità non come appendice moralistica, ma come analisi rigorosa degli squilibri territoriali. Tuttavia, come nota criticamente l'autore, «si tratta di due discipline che comprensibilmente si intrecciano, ma che non dovrebbero sovrapporsi, perché differenti ne risultano natura e obiettivi», e l'attuale assetto rischia di frammentare le “questioni vive” tra più insegnamenti senza un reale coordinamento epistemologico.

Le Linee Guida per l'Educazione Civica individuano tre nuclei concettuali: Costituzione, Sviluppo Sostenibile e Cittadinanza Digitale. La geografia è esplicitamente richiamata come disciplina cardine per il secondo nucleo; osserva che «la Geografia fornisce il contesto in cui si svolge l'Educazione civica: per esempio, aiuta gli studenti a comprendere i paesaggi fisici e culturali in cui essi vivono e i modi in cui questi paesaggi sono modellati dalle azioni umane». In questo quadro, la normativa impone alla disciplina di farsi carico dell'educazione alla sostenibilità non come appendice contenutistica, ma come analisi rigorosa degli squilibri territoriali. Tuttavia, come nota criticamente l'autore, «si tratta di due discipline che comprensibilmente si intrecciano, ma che non dovrebbero sovrapporsi, perché differenti ne risultano natura e obiettivi» (Ivi.), e l'attuale assetto rischia di frammentare le questioni vive tra più insegnamenti senza un reale coordinamento epistemologico.

È altrettanto interessante approfondire le evoluzioni sotto il profilo pratico-metodologico: il documento "Indicazioni nazionali e nuovi scenari" del MIUR ha introdotto modelli didattici fondati sul laboratorio diffuso, invitando ad abbandonare pratiche puramente espositive per privilegiare attività ibride, multimodali e integrate con risorse digitali (MIUR, 2018). Pur non mantenendo più la formalizzazione rigida del laboratorio disciplinare come spazio fisico separato, le nuove indicazioni ne trasferiscono la logica operativa entro contesti multiplatforma che includono *software* di visualizzazione e modellizzazione geografica dinamica (Pesaresi, 2017; Carbonell-Carrera; Bermejo-Asensio, 2017; Janowicz et al. 2020) e, se guardiamo ai recentissimi sviluppi, strumenti basati su intelligenza artificiale e realtà aumentata. Le stesse indicazioni ministeriali, inoltre, sembrano evidenziare una mutata concezione dell'osservazione geografica: da rilevamento d'aula o uscita didattica episodica a processo continuativo di indagine, radicato nel territorio vissuto dagli studenti ma connesso metodologicamente a scale superiori. Tale orientamento sottende una precisa strategia formativa: sviluppare competenze interpretative generali attraverso analisi situate che rendano percepibili i legami funzionali tra assetti locali e processi planetari. Il recepimento normativo di queste istanze si accompagna a raccomandazioni operative su temi come inclusione ed equità

nell'accesso alle tecnologie, incoraggiando l'uso di piattaforme open-source per evitare divari infrastrutturali (Fini, 2012; Caruso, Medina, Zanolin, 2018; Commissione Europea, 2023). Non mancano tuttavia elementi critici: parte della comunità docente manifesta resistenze verso questa revisione metodologica, temendo un indebolimento del patrimonio conoscitivo nozionistico considerato prerequisito irrinunciabile (Morri, 2021; Pasquinelli d'Allegra, 2022; De Lucia, Morri, 2025). Il rischio evidenziato è che l'enfasi sulla riflessione critica e sull'analisi sistemica possa condurre ad una sottovalutazione delle competenze fondamentali – toponomastica, cartografia di base – ancora necessarie per leggere con profondità i fenomeni territoriali. Tale posizione alimenta un dibattito irrisolto all'interno delle politiche scolastiche: trovare un equilibrio tra consolidamento della base enciclopedica della disciplina e acquisizione di capacità avanzate nell'interpretare le diverse relazioni spaziali. La dimensione valutativa non è meno interessata da queste modifiche: le linee guida riformulate implicano un'adeguata ridefinizione degli strumenti di verifica affinché possano misurare non solo apprendimenti riproduttivi, ma anche abilità nella correlazione fra i dati e il riconoscimento dei fenomeni geografici.

Va osservato come gli aggiornamenti ministeriali abbiano anche iniziato a integrare obiettivi relativi alla competenza digitale intesa in senso critico e analitico: ciò implica non soltanto saper utilizzare dispositivi tecnologici ma anche valutare l'affidabilità delle fonti cartografiche online e dei dataset geospaziali diffusi tramite piattaforme commerciali o istituzionali. La spinta verso AR/VR nella didattica è sostenuta dai testi normativi nella misura in cui questi strumenti siano inseriti in percorsi progettati secondo criteri epistemologicamente fondati; resta infatti chiaro nelle disposizioni ufficiali che la tecnologia debba essere funzionale al conseguimento degli obiettivi formativi e non attrattore fine a sé stesso (La Foresta, 2025; Zanolin, Gilardi, De Lucia, 2017; Çöltekin et al. 2020). Infine è rilevante sottolineare come le più recenti linee guida scandiscano apertamente il passaggio a modelli pedagogici inclusivi che valorizzino modalità multimodali dell'apprendimento geografico. Questo orientamento si traduce nella promozione normativa di pratiche differenti – dalla raccolta

collaborativa di dati territoriali alla costruzione partecipata di mappe narrative digitali – concepite per coinvolgere studenti con diversi stili cognitivi (Rose, Meyer, 2002). L'evoluzione non è dunque meramente lessicale o terminologica ma determina ricadute concrete su curriculum, criteri valutativi e modalità relazionali dell'insegnamento; obbliga docenti ed enti formatori a confrontarsi con codici comunicativi molteplici e con l'esigenza costante di collegare i contenuti disciplinari alle forme complesse della loro rappresentazione.

2.2 Il curriculum verticale e l'integrazione delle competenze digitali e geografiche

La costruzione di un curriculum verticale di Geografia, che si dipani con coerenza dalla scuola Primaria fino al termine della Scuola Secondaria, rappresenta una delle sfide più ardue e necessarie per il sistema scolastico italiano. La verticalità del curriculum non è soltanto una successione cronologica di argomenti, ma un processo di progressiva strutturazione delle categorie spazio-temporali e delle competenze interpretative. Come sottolineano Gavinelli e Gilardi (2022), «oggi più che mai serve una conoscenza al contempo umanistica e scientifica e una trasmissione di tali saperi nelle diverse società e nei sistemi scolastici chiamati a formare gli studenti che un giorno saranno adulti nel mondo». Un'architettura complessa in cui la spazializzazione dei contenuti e delle competenze vengano sviluppate gradualmente, mantenendo coerenza interna tra fasi diverse, evitando processi di codificazione della disciplina che cristallizzino categorie geografiche in formulazioni statiche (Zanolin, 2017). In questa prospettiva, il curriculum verticale deve prevedere una sequenza intenzionale di esperienze e concettualizzazioni tali da consolidare la territorializzazione come concetto chiave fin dai primi anni, inizialmente attraverso pratiche percettive e descrittive legate allo spazio vissuto, poi via via articolandola in quadro interpretativo capace di connettere fenomeni locali a reti globali. Una peculiarità del curriculum verticale in Geografia consiste nella necessità di integrare costantemente dimensioni cognitive differenti: dalla memorizzazione visuo-spaziale ai processi inferenziali multiscala, dalla decodifica di rappresentazioni iconiche alla problematizzazione delle relazioni causali tra variabili fisiche e antropiche (De Vecchis, Pasquinelli

d'Allegra, Pesaresi, 2020). L'articolazione temporalmente estesa consente di distribuire carichi cognitivi complessi evitando il sovraccarico nelle fasi iniziali, ma imponendo nei livelli intermedi e avanzati attività che combinino osservazione empirica, *outdoor education*, con analisi digitale immersiva (AR/VR) o collaborativa (*geobrowser* e GIS *open-source*) (Giorda, Rosmo, 2021). Questa scelta è coerente con gli approcci normativi più recenti in ambito scolastico, che tendono a sostituire la logica episodica delle Unità Didattiche con progetti a lungo termine (Castoldi et al., 2025), capaci di sedimentare le competenze critiche sulla spazializzazione. Tali progetti devono essere calibrati su un principio essenziale: ogni nuovo livello del curriculum deve incorporare, rielaborandoli criticamente, i contenuti precedenti. Se nella scuola primaria il discente esercita competenze localizzative elementari, punti cardinali, lettura semplificata di carte, nella secondaria di primo grado dovrà già confrontarsi con categorie come regione, scala o distanza (Frémont, Milanesi, Quaini, 1990); ciò implica per il docente un disegno curricolare che preveda obiettivi formativi incrementali e verificabili attraverso specifici indicatori (Zanolin, Gilardi, De Lucia, 2017). La verticalità non è data quindi dall'accumulo quantitativo di conoscenze ma dal passaggio qualitativo da semplici rappresentazioni dello spazio a modelli interpretativi complessi collegati anche alle dimensioni simbolico-politiche della cartografia (Farinelli, 2009; Casti, 2020). Il concetto trova ulteriore sostegno nelle recenti linee guida ministeriali che enfatizzano l'integrazione interdisciplinare e la continuità formativa mediante utilizzo sistematico della multiscalarità (Giorda, 2014; MIUR, 2012). Nella pratica applicativa questo si traduce nell'alternanza programmata tra osservazioni puntuali relative al territorio prossimo e analisi globalizzanti basate su *dataset* internazionali; entrambe le dimensioni vengono gestite nei diversi livelli scolastici secondo gradi crescenti di profondità analitica. Una tale impostazione impone anche una pianificazione coerente delle risorse digitali impiegate: nell'ottica verticale è insensato introdurre tecnologie immersive avanzate senza aver predisposto negli anni precedenti le basi cognitive per interpretarli criticamente (La Foresta, 2025; Giorda, Zanolin, 2020). La normativa incoraggia inoltre l'adozione di un curriculum verticale sensibile agli stili cognitivi

diversificati: ciò significa integrare rappresentazioni metriche rigorose per studenti orientati al ragionamento quantitativo con narrazioni visuo-contestualizzate per coloro che prediligono *landmark* simbolici o approcci qualitativi (Prunesti, Casagrande, 2012; Di Gioia, 2023). Lo sviluppo pluriennale permette modulazioni progressive: codici iconici basilari nei primi anni possono evolvere verso l'analisi critica dei *bias* cartografici nei livelli superiori, allenando capacità metacognitive rispetto alle fonti usate (Casti, 2008; Grillotti Di Giacomo, 2000). Sul piano della valutazione continua, un curriculum verticale efficace implica metriche integrate quantitative-qualitative nei diversi stadi dell'apprendimento: devono registrare l'evoluzione dalla capacità localizzativa a quella interpretativa sistemica. Ciò impone sin dall'inizio criteri valutativi calibrati sull'obiettivo finale del percorso: formare cittadini capaci di leggere simultaneamente fenomeni ambientali e socio-economici entro modelli correlativi multilivello (Dematteis, Giorda, 2013). Non basta dunque frammentare i contenuti per grado scolastico; occorre una strategia valutativa altrettanto verticale che accompagni e misuri il progresso cognitivo scalare.

Nella Scuola Secondaria di Primo Grado, la Geografia assume un ruolo centrale nel passaggio dall'osservazione diretta e sensibile dello spazio vissuto (tipica della primaria) all'astrazione e alla sistematizzazione delle conoscenze a scala planetaria. Le Nuove Indicazioni del 2025 individuano in questo segmento scolastico il momento per consolidare il «linguaggio della geo-graficità». Rucci, tuttavia, evidenzia una criticità strutturale:

[...] la persistenza di discontinuità metodologiche tra i due ordini di scuola produce spesso fratture educative [...] nel passaggio dalla Scuola primaria alla secondaria di primo grado, risentono della mancanza di quell'azione di sostegno formativo e di attenzione personalizzata che aveva contraddistinto la fase iniziale del percorso scolastico²².

In questa fase, l'integrazione delle competenze digitali diviene strategica ma spesso problematica. Non si tratta più solo di consultare un atlante cartaceo, ma di utilizzare *geobrowser*

²² Castoldi et al., 2025

come Google Earth o Bing Maps per “viaggiare” virtualmente. Trimarchi sottolinea come l’introduzione delle tecnologie richieda un ripensamento profondo,

[...] il confronto tra informatica e didattica non può avvenire senza una seria riflessione che coinvolga pienamente la pedagogia [...] Accogliere il computer o anche il videoregistratore non come presenze aliene, né come ripetitori di un copione già dato, ma come campi altrettanto naturali per l’azione e l’esplorazione cognitiva²³.

L’uso di strumenti digitali permette di realizzare confronti diacronici tra cartografia storica e immagini satellitari attuali, potenziando la capacità di lettura critica del paesaggio. Come dimostrato da Borettaz e Meynet, «il confronto tra le cartografie storiche e le rilevazioni satellitari di oggi [...] offre una nuova lettura del paesaggio [...] permettendo di uscire dagli stereotipi sulla geografia» (Borettaz, Meynet, 2022).

Il curriculum della Scuola Secondaria di Secondo Grado dovrebbe rappresentare il momento della maturazione critica e della capacità di analisi complessa. Tuttavia, in questo segmento l’insegnamento della Geografia soffre di una frammentazione eccessiva. Mastronunzio e Martellozzo denunciano una situazione critica nei Licei: «non solo dunque la cartografia non assurge a disciplina autonoma, ma questa non viene nemmeno menzionata, non essendo autonoma nemmeno la geografia in quanto disciplina» (Mastronunzio, Martellozzo, 2007). I programmi risentono di un’impostazione generica che accomuna elementi eterogenei, riducendo spesso la Geografia a una branca delle Scienze della Terra o a un corollario della Storia.

Nonostante ciò, l’integrazione digitale deve evolvere verso forme più avanzate di analisi spaziale. L’utilizzo di piattaforme di *Data Visualization* permette agli studenti di costruire le proprie carte tematiche; l’esperienza didattica descritta da Di Tommaso dimostra come l’uso di *software* cartografici (come *Scribble Maps* o *Dea Wings*) permetta agli studenti di «realizzare carte tematiche alla medesima scala, o a scale diverse – regionale, nazionale,

²³ Trimarchi, 2003

europea o mondiale –, al fine di spiegare un fenomeno complesso quale quello delle migrazioni» (Pioletti, Di Tommaso, Meynet, 2022). Questo tipo di attività trasforma lo studente da consumatore passivo di informazioni a produttore di conoscenza geografica, sviluppando un pensiero spaziale critico. Come afferma Trimarchi, «i computer sono strumenti ideali per la simulazione di sistemi complessi, poiché possono rapidamente e facilmente gestire milioni di calcoli e, dunque, delineare il comportamento di ampi sistemi di componenti tra loro interagenti» (Trimarchi, 2003), permettendo di visualizzare le conseguenze di decisioni prese in certe condizioni.

Un aspetto cruciale del curriculum verticale è l'educazione alla sostenibilità e alla cittadinanza. Fatichenti sottolinea come la Geografia debba farsi carico di temi come «l'emergenza climatica, la perdita della biodiversità, l'ingiustizia sociale [...] non a caso tutti riconducibili al noto programma di azione “Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile”» (Fatichenti, 2023). Tuttavia, l'analisi dei manuali scolastici rivela che spesso questi temi sono trattati in modo marginale o retorico. È necessario che il curriculum integri la dimensione digitale non solo come strumento tecnico, ma come ambito di riflessione etica: educare alla “cittadinanza digitale” significa anche comprendere come le rappresentazioni cartografiche digitali influenzino la nostra percezione del mondo e le decisioni politiche.

La riuscita di un curriculum verticale integrato digitalmente dipende in larga misura dalla continuità didattica e dalla formazione dei docenti. Rucci avverte che «la continuità valutativa non è solo un'esigenza tecnica, ma una condizione strutturale per un Curriculum che accompagni, senza soluzione di continuità, lo sviluppo cognitivo e formativo del soggetto in apprendimento». Spesso, invece, si assiste a una cesura netta tra i metodi attivi della primaria e la lezione frontale della secondaria. L'integrazione digitale, inoltre, non può essere improvvisata; richiede docenti formati non solo sull'uso strumentale del software, ma sulla didattica della geografia digitale. Mastronunzio e Martellozzo pongono, ancora, l'accento sulla carenza di preparazione specifica: «la diffusa carenza di preparazione dell'insegnante è al contempo causa ed effetto di una insufficiente cultura geografica [...] Come si può

insegnare geografia quando questa viene relegata esclusivamente agli insegnamenti accademici [...]?» (Mastronunzio, Martellozzo, 2007). È necessario promuovere una formazione che abiliti i docenti a selezionare risorse educative aperte (OER) di qualità, a costruire percorsi didattici ibridi e a valutare non solo le conoscenze, ma i processi di ricerca e interpretazione attivati dagli studenti. Trimarchi sottolinea che «il nostro ipotetico docente di geografia, senza con ciò intaccare o pregiudicare la sua competenza disciplinare [...] impara come funziona e come egli può far funzionare un computer; poi, in vista dell'attività didattica, va alla ricerca di applicazioni che siano coerenti con i contenuti e gli scopi del suo insegnamento» (Trimarchi, 2003).

2.3 Riferimenti giuridici e deontologici per l'uso di tecnologie immersive in ambito educativo e geografico

L'introduzione massiva di tecnologie digitali avanzate e immersive nella Didattica della Geografia – quali la Realtà Aumentata (AR), la Realtà Virtuale (VR), la Realtà Mista (MR) e l'utilizzo di piattaforme di mappatura collaborativa – non solleva soltanto questioni pedagogiche e metodologiche, ma impone una rigorosa riflessione sui quadri giuridici e deontologici che ne regolano l'uso. La scuola, in quanto istituzione pubblica ed educativa, è tenuta a operare all'interno di un perimetro normativo che tutela i diritti fondamentali degli studenti, la proprietà intellettuale e l'etica della rappresentazione.

L'analisi del quadro legislativo europeo e internazionale relativo all'impiego di tecnologie immersive in ambiti didattici implica una valutazione articolata della convergenza tra normative educative transnazionali, principi di accessibilità tecnologica e obiettivi epistemologici propri della disciplina. Nel contesto continentale, la cornice fornita dalle strutture dell'Unione Europea, in particolare i report Eurydice²⁴ sui sistemi educativi (Eurydice,

²⁴ Si veda il rapporto *Digital Education at School in Europe* (2019), che mappa lo stato dell'arte delle strategie nazionali per l'educazione digitale nei paesi membri.

2019), offre una rappresentazione stratificata delle politiche scolastiche che, pur variando sensibilmente nei singoli Stati membri, condividono l'obiettivo di integrare nei curricoli strumenti digitali avanzati come GIS collaborativi e ambienti di realtà aumentata o virtuale. La finalità dichiarata è promuovere competenze chiave trasversali, quali la capacità critica nell'uso dei dati geospaziali e la lettura transcalare dei fenomeni territoriali, evitando al contempo che la tecnologia venga relegata a "strumento spettacolare" privo di connessione con il sapere disciplinare. La struttura normativa europea si articola in un insieme di raccomandazioni non vincolanti ma fortemente influenti sulle linee guida nazionali; la Commissione europea, anche attraverso EACEA/Eurydice, sottolinea l'esigenza di garantire pari accesso alle risorse tecnologiche e di evitare divari digitali interni (Commissione Europea, DESI Report, 2023). Questa impostazione implica una duplice responsabilità: da un lato assicurare infrastrutture minime uniformi, con particolare attenzione ai contesti scolastici periferici o socio-economicamente svantaggiati, dall'altro integrare criteri comuni per la validazione delle fonti cartografiche digitali, così da prevenire distorsioni epistemiche dovute a *dataset* parziali o culturalmente orientati. È significativo notare come le raccomandazioni europee pongano già il problema della meta-informazione: viene riconosciuto che ogni rappresentazione territoriale digitale è una costruzione situata e pertanto necessita di apparati educativi che ne esplicitino natura e limiti interpretativi (Kitchin, 2011). Sul piano internazionale, organismi multilaterali come UNESCO e il Consiglio d'Europa hanno contribuito a delineare principi generali per l'integrazione tecnologica nelle pratiche didattiche geografiche. La «*International Charter on Geographical Education*» (IGU - CGE, 2016) individua nell'approccio globale-integrato alla formazione una leva politica ed epistemologica: secondo questa visione, strumenti immersivi devono avere funzione esplicita nella costruzione del pensiero critico territoriale, sostenendo competenze trasversali quali la correlazione fra scala locale e processi globali (Giorda, 2017; Puttilli, Santangelo, 2018; Giorda, Puttilli, 2019). Tali documenti accentuano inoltre il legame tra uso delle tecnologie immersive ed educazione alla cittadinanza attiva: operare in contesti simulati che riproducano scenari geo-ambientali

complessi serve non solo all'acquisizione tecnica ma anche alla sperimentazione consapevole di *decision-making* su questioni territoriali collettive. Emergono tuttavia divergenze metodologiche rilevanti tra le formulazioni europee e quelle provenienti da altri contesti internazionali; se le prime tendono a declinare gli obiettivi in termini di standard comuni per infrastrutture e competenze digitali minime, le seconde enfatizzano più spesso il principio di adattamento culturale degli strumenti alla specificità regionale. Ciò genera tensione interpretativa quando si tenta di armonizzare linee guida globali con protocolli applicativi nazionali caratterizzati da vincoli politici o economici differenziati (Nye, 2015). Il nodo centrale è garantire che questa armonizzazione non elimini peculiarità locali né rafforzi gerarchie culturali implicite nelle piattaforme proprietarie transnazionali; l'opzione preferita in sede europea rimane quella dell'adozione prioritaria di *software open-source* scalabili. In termini giuridici operativi, la legislazione comparata evidenzia come l'applicazione concreta degli apparati normativi sia profondamente condizionata dal grado di vincolatività previsto: nei paesi dove le raccomandazioni europee sono recepite mediante leggi statali specifiche sull'educazione digitale (talvolta integrate da regolamenti ministeriali dettagliati), la coerenza tra obiettivi formativi geografici e strumenti tecnologici risulta più alta; al contrario, laddove esse restano indicazioni programmatiche senza obblighi legislativi stringenti, si osserva un'attuazione frammentaria dominata dall'iniziativa locale delle singole istituzioni scolastiche. Il rischio qui è doppio: da un lato produrre disparità interne agli Stati membri; dall'altro ridurre le tecnologie immersive alla dimensione opzionale, relegandole a progetti extracurricolari invece che integrarle stabilmente nel curriculum verticale (Borettaz, Meynet, 2022).

Un ulteriore elemento critico riguarda le norme sulla protezione dei dati nell'utilizzo educativo delle piattaforme immersive. La legislazione europea di riferimento, Regolamento (UE) 2016/679 (GDPR), impone requisiti stringenti sul trattamento delle informazioni personali generate da applicazioni web e AR/VR; in ambito didattico geografico questo include dati georeferenziati raccolti dagli studenti durante esercitazioni collaborative. La gestione

conforme deve prevedere anonimizzazione efficace dei *dataset* condivisi e controllo sugli accessi alle mappe partecipative; tali obblighi entrano però spesso in conflitto con funzionalità intrinseche delle piattaforme utilizzate, richiedendo adattamenti tecnici complessi che non tutte le scuole sono in grado di implementare autonomamente. Qui si inserisce la necessità normativa di predisporre guide operative centrali per garantire conformità senza ostacolare l'esperienza formativa (Adel, 2020; Morri, Pavia, Pesaresi, 2023).

L'esame approfondito del quadro legislativo europeo, mette dunque in luce una tensione costante fra uniformità regolatoria necessaria per garantire standard minimi europei ed eterogeneità culturale imprescindibile per mantenere rilevanza contestuale degli interventi formativi geografici. La sfida consiste nel tradurre principi generali, accessibilità equa alle tecnologie immersive; integrazione metodologica coerente con l'epistemologia della geografia; protezione dei dati personali; neutralità culturale dei contenuti, in disposizioni attuative capaci di incidere nella pratica quotidiana scolastica senza produrre derive omologanti o esclusioni involontarie.

Un altro nodo giuridico riguarda il diritto d'autore e la proprietà intellettuale dei materiali didattici e cartografici. Nell'era della «disintermediazione» digitale, dove docenti e studenti attingono copiosamente da internet per costruire le proprie risorse, la distinzione tra utilizzo lecito e violazione del copyright diventa spesso sfumata. Fini evidenzia come il modello tradizionale del copyright (tutti i diritti riservati) mal si concili con le esigenze di una didattica basata sulla condivisione, la modifica e il riuso dei contenuti:

I progetti OER e OC [Open Content] in generale risentono di quel fenomeno noto come “disintermediazione” [...] per cui gli utenti sono abilitati direttamente alla pubblicazione di contenuti, senza alcuna forma di valutazione preventiva²⁵.

In ambito geografico, questo problema è particolarmente acuto per quanto riguarda le carte geografiche, le immagini satellitari e i dati geospaziali, spesso coperti da licenze proprietarie

²⁵ Fini, 2012.

restrittive. Trimarchi nota che «gran parte della terminologia comunemente usata in ambito telematico proviene da questa disciplina: si parla di “navigazione” su internet, di “nodi”, di “collegamenti” [...] di “mappatura” delle reti» (Trimarchi, 2003), sottolineando la compenetrazione tra geografia e digitale. Tuttavia, l'uso di piattaforme proprietarie può limitare la libertà didattica. La soluzione giuridica e culturale risiede nell'adozione delle Risorse Educative Aperte (OER - *Open Educational Resources*). Fini definisce le OER come «la disponibilità in modalità aperta di risorse educative [...] per la consultazione, l'utilizzo e il riuso da parte di una comunità di utenti, per scopi non commerciali» (Fini, 2012). Le licenze *Creative Commons* (CC) offrono un quadro giuridico flessibile che permette agli autori di concedere alcuni diritti al pubblico; ancora, spiega che «il copyleft è generalmente inteso come un sistema di clausole legali che non mette in discussione totalmente il diritto d'autore ma, appoggiandosi su quest'ultimo, ne fornisce una diversa interpretazione» (Ivi.). Insegnare agli studenti a utilizzare risorse aperte (come le immagini con licenza CC-BY o CC-BY-SA) significa educarli al rispetto del lavoro intellettuale altrui e ai principi della condivisione della conoscenza come bene comune. La clausola “SA - Condividi con la stessa licenza” implica, a esempio, che «il contenuto può essere modificato e rielaborato da terzi ma a patto che essi utilizzino lo stesso tipo di licenza per i prodotti basati sul contenuto originale», promuovendo un ciclo virtuoso di produzione culturale.

Oltre agli aspetti più strettamente giuridico-legali, l'uso delle tecnologie immersive nella didattica interroga anche la deontologia dell'insegnante. La Geografia ha il potere di costruire immaginari, e le tecnologie immersive amplificano questo potere; esiste, pertanto, un rischio etico legato alla rappresentazione dell'alterità e dei luoghi lontani. Le esperienze di “turismo virtuale” o di esplorazione di contesti di crisi tramite VR o AR possono scivolare in forme di banalizzazione della complessità se non mediate criticamente; «la disintermediazione richiede una maggiore attenzione alla qualità e all'affidabilità delle fonti» (Fini, 2012). Il docente ha, quindi, la responsabilità di selezionare contenuti che rispettino la dignità delle persone rappresentate e che evitino la riproduzione di stereotipi coloniali; inoltre,

l'etica «geografica digitale» riguarda l'equità di accesso: se le tecnologie diventano parte integrante del curriculum, la scuola deve garantire che nessuno studente ne sia escluso. In questo senso, «il rischio da scongiurare [...] è quello di cadere in una logica sommativa e selettiva», principio che vale anche per l'accesso alle risorse tecnologiche. L'uso di strumenti *low cost* e *open source* risponde anche a questa esigenza etica di democratizzazione dell'accesso al sapere geografico avanzato. Trimarchi conclude che «la necessità di informazione geografica è in primo piano. Ma la geografia non è una sequenza di informazioni numeriche [...] La Geografia è scienza di relazioni e di rapporti» (Trimarchi, 2003), e la tecnologia deve essere al servizio di questa comprensione relazionale, non un fine a sé stessa.

3. L'evoluzione delle osservazioni geografiche: dall'osservazione diretta a quella immersiva in AR-VR e MR

3.1 L'atto geografico dell'osservazione: definizioni, metodi tradizionali e limiti contemporanei

L'osservazione costituisce l'atto fondativo, la *arché* epistemologica della Geografia; prima di ogni modellizzazione, di ogni astrazione cartografica o teorizzazione spaziale, vi è lo sguardo del geografo che si posa sul mondo. Tuttavia, definire l'osservazione geografica come un semplice atto retinico di registrazione passiva della realtà fenomenica sarebbe un errore grossolano, retaggio di un positivismo ingenuo ormai superato. L'osservazione è, al contrario, un processo cognitivo attivo, selettivo e culturalmente mediato: è una pratica di "territorializzazione intellettuale" attraverso la quale il soggetto ritaglia porzioni di caos, ordinandole in *Kosmos*²⁶ (Farinelli, 2003; Tanca, 2023; Capuano et al., 2023). La Geografia

²⁶ Il concetto di osservazione come atto fondativo che trasforma il *chaos* (la natura indistinta) in *Kosmos* (l'universo ordinato e "adorno") è centrale nell'opera di Alexander von Humboldt. Egli definisce il *Kosmos* non come una semplice raccolta di dati empirici, ma come il risultato di una sintesi intellettuale attiva in cui la mente umana, attraverso la ragione e la sensibilità estetica, ordina la "totalità dei fenomeni". Per una disamina del passaggio dal dato sensibile alla costruzione intellettuale del mondo, si veda l'introduzione a: A. von

contemporanea ha progressivamente messo in discussione l'idea di un osservatore esterno ed oggettivo, riconoscendo che la costruzione del sapere geografico è il risultato di interazioni dinamiche tra soggetto e oggetto d'indagine. In tal senso, Dematteis afferma che «l'osservazione è sempre una mediazione tra l'esperienza sensibile e il linguaggio scientifico» (Dematteis, Ferlaino, 2003), ponendo l'accento sulla necessità di formalizzare metodologie rigorose per evitare derive impressionistiche.

Il confronto tra autori mostra una tensione persistente: da un lato vi è chi privilegia approcci descrittivi basati sulla ricognizione empirica del territorio; dall'altro chi, seguendo prospettive critiche, sottolinea il ruolo delle categorie analitiche e dei modelli teorici preesistenti nell'influenzare ciò che viene osservato (Claval, Retailé, 1995). Questa dialettica costituisce il nucleo metodologico della geografia scientifica, nella quale lo sforzo di oggettivazione convive con la consapevolezza dell'inevitabile parzialità dello sguardo. L'atto dell'osservazione, pertanto, non si esaurisce nell'acquisizione di dati visivi o misurabili, ma implica un processo interpretativo complesso che deve essere dichiarato e giustificato nei suoi presupposti teorici (Sack, 1986)²⁷. Solo attraverso tale esplicitazione è possibile garantire solidità al discorso geografico e favorire un confronto critico fondato tra diverse prospettive disciplinari.

Storicamente, la Geografia ha costruito la propria legittimità scientifica sul primato della visione. Da Alexander von Humboldt, che fece dell'osservazione empirica diretta

Humboldt, *Kosmos: Entwurf einer physischen Weltbeschreibung*, Cotta, Stuttgart, 1845 (trad. it. *Il Cosmo. Saggio di una descrizione fisica del mondo*, a cura di F. Farinelli, Pordenone, Studio Tesi, 1986).

Sull'interpretazione dell'osservazione humboldtiana come pratica di "territorializzazione" e sulla riduzione del mondo a modello attraverso la logica cartografica, si rimanda all'analisi critica di Franco Farinelli (Farinelli, 2003), in particolare ai capitoli dedicati alla "ragione cartografica" e alla costruzione del paesaggio come dispositivo di conoscenza. Farinelli evidenzia come per Humboldt la conoscenza non sia mai passiva, ma una "imposizione di senso" che trasforma la *natura* (esterna) in *concetto* (interno). Su questa posizione Cfr. anche Tanca, 2023.

²⁷ Cfr. Dematteis (1985), secondo cui la descrizione geografica non è mai neutrale ma implica l'uso di metafore cognitive; Vallega (2004), che pone l'accento sulla semiosi del paesaggio e sul ruolo attivo dell'osservatore. Per gli sviluppi recenti sul ruolo della riflessività e dell'interpretazione nella ricerca sul campo, Cfr. Bignante (2011), Minca e Colombino (2012) e Greiner, Dematteis e Lanza (2019), i quali ribadiscono come la dichiarazione del posizionamento teorico sia garante di rigore scientifico.

(*Anschauung*) il cardine della sua *Physik der Welt*, fino alla Geografia regionale vidaliana (Fremont, 1978; Vallega, 2004), lo «sguardo (*le regard*)» è stato lo strumento privilegiato per cogliere la sintesi tra elementi fisici e antropici che costituiscono il paesaggio. Come notano Gavinelli e Gilardi, «il paesaggio è innanzitutto uno spazio sociale abitato e praticato, una fruizione culturale [...] il fatto che il paesaggio susciti anche emozioni estetiche positive risulta di secondaria importanza» (Gavinelli, Gilardi, 2022). Questa tradizione, soprattutto guardando agli sviluppi contemporanei, ha spesso rischiato di scivolare in un «oculocentrismo» che riduce la complessità sistemica del territorio ai suoi soli aspetti morfologici e visibili, trascurando le dinamiche invisibili (flussi finanziari, relazioni di potere, memorie sotterranee, evoluzioni diacroniche) che pure strutturano lo spazio.

Il metodo tradizionale dell'osservazione geografica si è a lungo basato sulla dicotomia tra l'osservazione "*in situ*" (il viaggio, l'esplorazione) e l'osservazione "*ex situ*" (l'analisi della carta o di immagini). Poli ricorda come la Geografia applichi «il metodo galileiano della ricerca, quel metodo cioè che partendo dall'osservazione e dalla classificazione dei fatti e dei fenomeni, li analizza e li interpreta» (Poli, 2011-a;). Questi metodi empirici dell'osservazione geografica si fondano su una concezione operativa della disciplina che prevedono la raccolta diretta di informazioni sul campo, spesso in contesti fisici selezionati per la loro rilevanza didattica o scientifica, e su procedure codificate di descrizione, misurazione e classificazione del paesaggio. Questo approccio, radicato storicamente in pratiche consolidate come le escursioni scolastiche in campagna o in città, non va interpretato come mera traslazione dell'esperienza sensoriale in dati grezzi: esso costituisce un insieme strutturato di operazioni mirate a leggere criticamente la relazione tra componenti fisiche e antropiche nella territorializzazione (Turco, 1988; Magnaghi, 2001). Le uscite sul territorio sono concepite come momenti applicativi delle nozioni acquisite in aula, coinvolgendo competenze quali la lettura della carta geografica, l'uso di strumenti per l'orientamento, il disegno di schizzi prospettici del panorama e l'identificazione degli elementi salienti del paesaggio; strumenti elementari, che Giuseppe Dalla Vedova considerava "ferri del mestiere" irrinunciabili per un

buon insegnamento della Geografia, che permettono una decodifica diretta della spazializzazione senza mediazioni tecnologiche troppo complesse. L'epistemologia sottesa a tali pratiche riconosce alla percezione visiva e alla manipolazione concreta dei supporti cartografici un ruolo centrale; si tratta di attività fortemente legate alla materialità dello spazio, nelle quali il corpo risulta essere il *medium* principale attraverso cui esperire i luoghi (Varela et al. 1991; De Spuches, 2021); l'atto stesso di percorrere un sentiero o attraversare una valle costituisce esperienza formativa tanto quanto la registrazione quantitativa dei dati osservati. La componente motoria non è un «accessorio logistico», ma parte integrante del processo cognitivo: consolida la capacità di orientarsi, di relazionare coordinate metriche con *land-mark* osservati, di interiorizzare percorsi nello spazio realmente vissuto. In questo senso, il metodo empirico tradizionale contribuisce alla costruzione del senso del luogo mediante l'incorporazione nell'esperienza corporea delle sequenze topografiche incontrate.

Sul piano operativo, questi metodi si articolano in fasi ben definite: scelta del luogo d'indagine (spesso in relazione con argomenti studiati in classe), pianificazione dell'itinerario con consultazione preventiva delle carte, esercizio sistematico di rilevamento sul campo attraverso osservazioni (Guarrasi, 2006; Poli, 2011-b). Tale sequenzialità deve generare un *corpus* documentale primario, note scritte a mano, disegni dal vero, schede osservative, che fungono da base per successive elaborazioni interpretative. La spazializzazione risultante dal metodo tradizionale è dunque costruita a partire da dati che mantengono un forte legame con la percezione individuale; se da un lato ciò garantisce autenticità e contestualità dell'informazione raccolta, dall'altro espone l'osservazione a *bias* percettivi inevitabili derivanti dalla selettività dello sguardo umano. Il valore pedagogico dei metodi empirici tradizionali risiede anche nella loro capacità di rendere tangibili concetti teorici appresi astrattamente: nozioni come la morfologia fluviale, la zonizzazione climatica o la distribuzione insediativa possono essere concretizzate davanti agli occhi degli studenti e manipolate direttamente tramite esercizi pratici. Questo passaggio dalla teoria alla manifestazione concreta rafforza l'apprendimento e lo rende significativo (Castelnovi, 2017). Allo stesso tempo, però, tali

metodi possono incorrere in una osservazione statica delle categorie geografiche: il paesaggio collinare osservato viene fissato nelle mappe o nei disegni come una configurazione definitiva, ignorando la dinamica diacronica dei processi geomorfologici o socioeconomici che la modellano (Dematteis, 1985). Questo procedimento induttivo, che va dal particolare al generale, ha permesso certamente di accumulare un vasto patrimonio di conoscenze descrittive. I limiti contemporanei di tale approccio sono evidenti. In un mondo caratterizzato da quella che Bauman definisce «modernità liquida», dove i confini sono porosi e i fenomeni transcalari, l'osservazione tradizionale fatica a cogliere la rapidità delle trasformazioni; l'indagine rimane ancorata al micro-spazio visitato e raramente collegata a fenomeni extra-locali: mancano protocolli specifici per inserire le evidenze locali entro reti di causa-effetto più ampie.

La critica post-strutturalista e la *Non-Representational Theory* – NRT – (Thrift, 2008)²⁸ hanno decostruito la presunta oggettività della rappresentazione, mettendo in luce come l'atto di osservare non sia mai un processo neutro o passivo. Al contrario, lo sguardo del geografo è sempre un «sguardo situato» (Haraway, 1988), inevitabilmente influenzato dal posizionamento culturale. Come sottolineato in *Social Formation and Symbolic Landscape*²⁹, «il concetto del paesaggio è frutto di un'élite urbana che ha voluto celebrare esteticamente il suo controllo dello spazio»;

²⁸ La *Non-Representational Theory* (NRT) critica l'ossessione della Geografia tradizionale per la rappresentazione statica (mappe, testi, immagini), sostenendo che gran parte dell'esperienza umana è pre-cognitiva, affettiva e performativa. Secondo Thrift, l'osservazione non dovrebbe limitarsi a decodificare simboli visivi, ma dovrebbe sintonizzarsi sulle pratiche quotidiane, sui flussi e su "ciò che accade" prima ancora di essere rappresentato.

²⁹ In quest'opera seminale, Cosgrove definisce il paesaggio non come un semplice oggetto materiale, ma come un «modo di vedere» (*way of seeing*) ideologico, storicamente determinato, che riflette la transizione verso il capitalismo e l'affermazione della borghesia urbana nell'Europa moderna (in particolare nell'Italia rinascimentale e in Inghilterra).

the landscape idea [...] represents a way of seeing – a way in which some Europeans have represented to themselves and to others the world about them and their relationships with it, and through which they have commented on social relations³⁰.

Se comparata alle attuali tecnologie immersive, emerge chiaramente come l'assenza di interfacce che consentano visualizzazioni multi-livello riduca le potenzialità interpretative dell'atto osservativo. Dal punto di vista tecnico-metodologico l'affidabilità dei dati derivanti dai metodi empirici tradizionali dipende ampiamente dalla preparazione dell'osservatore: senza formazione specifica sulle convenzioni cartografiche o sulle tecniche di misurazione angolare, il rilievo risulta impreciso o parziale; inoltre la necessità di affidarsi quasi esclusivamente a fonti proprie comporta margini ridotti di verifica incrociata: le mappe tracciate durante l'escursione raramente vengono comparate sistematicamente con documenti ufficiali aggiornati o immagini telerilevate. Questa autosufficienza cognitiva favorisce certamente l'autonomia ma rischia derive localistiche prive di contestualizzazione sovralocale.

Un ulteriore aspetto cruciale riguarda la dimensione culturale implicita nell'osservazione diretta. Il paesaggio non viene mai percepito come aggregato neutro di elementi fisico-geografici; ogni sguardo incorpora codici simbolici derivanti dalla cultura dell'osservatore e dalle narrative territoriali dominanti. Nei metodi tradizionali mancano spesso momenti espliciti volti a decostruire queste influenze culturali: gli studenti apprendono tacitamente a leggere lo spazio secondo schemi consolidati dall'autorità accademica o manualistica senza problematizzare possibili rappresentazioni alternative. Pur con queste intrinseche limitazioni, la scarsa transcalarità fattiva, il rischio di ridurre a categorie statiche l'osservazione del territorio, i metodi empirici tradizionali costituiscono ancora l'ossatura imprescindibile nel *curriculum* geografico; essi garantiscono una prima forma di alfabetizzazione cartografica diffusa e contribuiscono a sedimentare competenze percettive fondamentali nell'*orienteeering* e nella lettura diretta del paesaggio. La sfida attuale consiste nel preservarne i punti di forza integrandoli criticamente con strumenti digitalmente mediati per superare limiti

³⁰ Cosgrove, 1998.

interpretativi ed estendere l'analisi alle dimensioni multiscala richieste dal mondo contemporaneo. La Geografia odierna necessita di un'osservazione che non sia solo "visione" ma "esperienza", capace di integrare la dimensione aptica, sonora e cinestetica dell'abitare. È qui che la tecnologia si inserisce non come protesi, ma come nuovo ambiente cognitivo, imponendo una rifondazione dell'atto osservativo che dal "guardare" passi "all'essere immersi".

3.2 L'Osservazione diretta (*Fieldwork*) e l'apprendimento del sapere geografico

L'Osservazione Diretta, o *Fieldwork*, rimane una delle metodologie centrali della pratica geografica, volta a raccogliere dati primari attraverso la presenza fisica del ricercatore nel contesto di studio. Tale approccio consente di registrare comportamenti, interazioni e dinamiche ambientali in modo immersivo e contestualizzato, riducendo l'interferenza di mediazioni interpretative esterne. Nonostante l'avvento delle tecnologie digitali e la disponibilità di *big data*, l'esperienza corporea dello spazio conserva un valore euristico insostituibile. Come affermano Mastronunzio e Martellozzo, «gli strumenti adeguati ad una "lettura del territorio" non possono prescindere dalle lezioni itineranti sul terreno e dal viaggio di studio geografico» (Mastronunzio, Martellozzo, 2007).

Il *fieldwork* non è una semplice gita scolastica o un turismo accademico; è un protocollo scientifico che richiede preparazione, metodo e capacità di rielaborazione (Ivi.). Nella costruzione del sapere geografico, l'uscita sul terreno svolge una funzione insostituibile di validazione ecologica delle conoscenze; se in aula o sui libri il territorio appare come un modello semplificato, sul campo esso esplode nella sua complessità, fatta di rumori, odori, incontri imprevisti e sovrapposizioni temporali. È attraverso l'osservazione diretta che lo studente comprende la differenza tra lo spazio geometrico (*space*) e il luogo antropologico (*place*), inteso come spazio investito di significati e valori. Rocca e Gasparini (2022) sottolineano l'importanza di trasformare l'evento in esperienza:

«che lo si voglia o no, ogni qual volta ci muoviamo nello spazio entriamo in relazione con il mondo, interagiamo con esso, maturiamo un vissuto, a noi la decisione – più o meno consapevole – di trasformarlo in esperienza che nell'ex-per-ire esercita la funzione del poter disporre»³¹.

Uno degli elementi qualificanti di questa pratica è l'elaborazione autonoma di ipotesi di ricerca a partire da percezioni dirette del paesaggio osservato; tale operazione implica un passaggio critico dalla lettura empirica alla modellizzazione concettuale, in cui dati apparentemente frammentari vengono correlati entro reti causali che ne spiegano la genesi e le trasformazioni. Ciò richiede che l'attività in situ sia organizzata non come mera ricognizione visiva, ma come protocollo sperimentale integrato: raccolta sistematica di variabili fisiche (morfologia, clima, idrografia) e socio-culturali (usi del suolo, organizzazioni insediative, infrastrutture) accompagnata da annotazioni interpretative fondate sulle categorie disciplinari della territorializzazione e della spazializzazione (Betti, Borghi, Virgini, 2023; Turco, 1988). La valenza formativa del lavoro sul campo, soprattutto nella didattica geografica contemporanea, si esprime nel suo potere di ridurre la distanza tra conoscenza teorica e contatto diretto con la complessità territoriale. Questo avviene quando l'esperienza non si limita ad applicare passivamente nozioni precedenti ma diviene occasione per problematizzare concetti apparentemente consolidati: così l'osservazione di un confine amministrativo in una località periferica può stimolare la discussione critica sulla sua funzione storica e sul suo impatto nelle pratiche quotidiane della comunità (Raffestin, 2022³²).

Dal punto di vista didattico, l'osservazione diretta attiva processi cognitivi superiori. Non si tratta solo di riconoscere forme (il fiume, la montagna, l'edificio), ma di interrogare i processi. Un'attività didattica condotta con un primo biennio del Liceo delle Scienze Umane prevedeva una serie di attività di osservazione in cui

³¹ Rocca, Gasparini, 2022.

³² Raffestin analizza come il confine non sia solo una linea amministrativa ma un sistema di relazioni di potere che influenza la vita quotidiana ("Geografia del potere").

«la terza è una vera seduta di lavoro sul campo: i ragazzi hanno una carta del comune e una serie di istruzioni scritte [...]. Durante il percorso devono osservare ciò che vedono e fotografare i diversi tipi di abitato, di attività economica»³³.

In questo processo, il corpo del discente diventa strumento di misura e di percezione. Sul piano metodologico-operativo, un fattore decisivo è il grado di partecipazione attiva dei soggetti coinvolti; nella prospettiva più avanzata il lavoro sul campo si configura come evento co-costruito tra docente e studenti, dove le scelte dei punti d'osservazione e delle variabili da rilevare scaturiscono da un processo negoziale interno al gruppo. Questa modalità rompe il modello trasmissivo *top-down* permettendo allo studente di assumere ruolo proattivo nella costruzione del sapere geografico. Le percezioni individuali diventano così parte integrante della ricerca collettiva, conferendo all'attività un senso condiviso e contestualizzato. La «geografia dei piedi», del camminare, permette di acquisire una conoscenza cinestetica delle distanze, delle pendenze e delle rugosità del terreno che nessuna mappa digitale può restituire appieno (Estes, Hortas, Mendes, 2018).

Il ruolo strategico del *fieldwork* si evidenzia ulteriormente nel rapporto con le tecnologie digitali introdotte nella didattica innovativa. L'integrazione fra rilevamento diretto e successiva elaborazione in cartografie digitali o visualizzazione in AR consente verifiche immediate sull'attendibilità dei modelli digitalmente mediati (Zanolin, Gilardi, De Lucia, 2017; Çöltekin et al. 2020; La Foresta, 2025) lontano dal sostituirsi all'esperienza sensoriale, questi strumenti amplificano la capacità analitica fornendo livelli multipli di informazione da sovrapporre criticamente alle impressioni raccolte sul posto. Tale integrazione tecnologica, tuttavia, conserva efficacia solo se accompagnata da momenti riflessivi in cui si confrontino i dati digitalizzati con quanto rilevato direttamente durante l'osservazione diretta. Nel panorama normativo-educativo attuale (MIUR, 2012/2025; Castoldi et al., 2025), il lavoro sul

³³ Da un intervento didattico di Geografia e Storia condotto dal sottoscritto in tre lezioni presso il Liceo delle Scienze Umane di Civitanova Marche – MC.

campo assume anche valenza regolativa: gli indirizzi ministeriali italiani ribadiscono l'importanza della connessione tra vissuto locale degli studenti ed elaborazioni teoriche globali (MIUR, 2018; MIM, 2024); ciò impone al *fieldwork* una progettualità inclusiva che tenga conto delle differenze cognitive e culturali presenti negli allievi: diversificare strumenti e linguaggi utilizzati sul campo (schedatura metrica rigorosa accanto a specifiche tecniche di *storytelling* geografico o *placetelling* (Caquard, 2013; Pollice et al. 2020) permette agli studenti con differenti stili di apprendimento di appropriarsi di questa pratica investigativa. Va, inoltre, considerato il contributo del lavoro sul campo alla formazione meta-cognitiva. L'atto stesso di pianificare un'uscita scientifica comporta acquisizione di competenze trasversali quali gestione logistica dell'indagine, valutazione preventiva dei rischi territoriali e predisposizione etica alla protezione dei dati personali eventualmente raccolti durante attività collaborative (Adel, 2020). Queste dimensioni organizzative ed etico-deontologiche sono parte integrante dell'apprendimento geografico complesso: consentono di inscrivere l'osservazione diretta entro protocolli riproducibili e oggettivi.

Questa tipologia di osservazione diretta, tuttavia, non è esente da criticità; essa richiede un tempo lento, un sostare che contrasta con la frenesia dei tempi scolastici e accademici. L'osservazione diretta, inoltre, necessita di strumenti di mediazione e documentazione per non risolversi in un'impressione fugace. Rocca e Gasparini propongono l'uso del diario di bordo come strumento metacognitivo fondamentale:

«Nel lavoro sul campo in ambito geografico, il diario di bordo costituisce lo strumento di reportistica per eccellenza, un mediatore per il geografo quando analizza il territorio, vive i luoghi, abita l'ambiente, percepisce i paesaggi»³⁴.

Attraverso la scrittura riflessiva e il disegno dal vero, l'osservazione diretta si sedimenta in sapere consapevole, permettendo di «connettere la sperimentazione di un'esperienza al

³⁴ Rocca, Gasparini, 2022.

senso e al valore che la persona vi attribuisce». Il *fieldwork* è il luogo dove si costruisce una possibile «geografia personale», quella mappa interiore che orienta il cittadino nel mondo.

3.3 L'osservazione Indiretta (Cartografia, Immagini satellitari, carte digitali) e la mediazione tecnologica

Se l'osservazione diretta è immersione nel reale, l'osservazione indiretta è il regno della mediazione simbolica e tecnologica. La Geografia ha sempre necessitato di strumenti per vedere ciò che l'occhio umano non può cogliere nella sua interezza e totalità: la Terra stessa. La cartografia è stata, per secoli, la «protesi» visiva del geografo, il modello attraverso cui ridurre la complessità del mondo a una forma intellegibile e comunicabile. Tuttavia, come sostiene Farinelli, questa mediazione non è neutra: «la carta topografica ci suggerisce l'idea di spazio come contenitore di oggetti, anche nell'immaginario del senso comune diventa un modo di concepire mitico-simbolico dello spazio³⁵» (Farinelli, 2003).

La cartografia – nella sua accezione tradizionale – ha rappresentato per secoli uno strumento fondamentale di codificazione spaziale, fondato su convenzioni grafiche e simboliche atte a sintetizzare configurazioni territoriali complesse in rappresentazioni bidimensionali stabili. Tale impostazione si collocava in un paradigma scientifico in cui la carta veniva intesa come espressione di un ordine geo-grafico convenzionale, distinto e autonomo rispetto alle entità reali raffigurate (Casti, 2020; Farinelli, 2009). L'obiettivo primario era fornire un modello di riferimento statico, frutto di un processo di riduzione della realtà mediante selezione e gerarchizzazione degli elementi rilevanti, secondo criteri geometrici e topologici considerati

³⁵ Franco Farinelli, in «*Geografia. Un'introduzione ai modelli del mondo*», argomenta come la carta geografica non sia una copia del mondo, ma il modello che ha plasmato la nostra concezione del mondo stesso, sostituendo la realtà con la sua rappresentazione geometrica (la "ragione cartografica").

universali. In questo quadro, la territorializzazione risultava incorporata implicitamente nella scelta dei confini, delle denominazioni toponomastiche e delle categorie tematiche adottate: l'atto cartografico si configurava come operazione di sintesi materiale e culturale, ma non come pratica dichiaratamente interpretativa. L'approccio tradizionale ha contribuito alla sedimentazione di competenze tecniche essenziali, lettura delle coordinate, comprensione delle curve di livello, decodifica di simbologie standard, che ancora oggi costituiscono prerequisiti conoscitivi irrinunciabili per qualsiasi utilizzo della cartografia (Mastronunzio, Martellozzo, 2007). Tale modello, tuttavia, innescava un principio interpretativo per cui le mappe venivano percepite come immagini definitive dello spazio e non come rappresentazioni situate nel tempo; ne derivava una limitata capacità di restituire i processi dinamici (mutamenti d'uso del suolo, trasformazioni infrastrutturali) che progressivamente ridefiniscono la spazializzazione reale. L'assenza di interattività impediva aggiornamenti rapidi e obbligava l'utente a sovrapporre alla rappresentazione statica le proprie ipotesi sulle modifiche intervenute. Il passaggio alla cartografia moderna, sostenuto dalla diffusione dei sistemi informativi geografici (GIS) e dall'accessibilità di immagini satellitari ad alta risoluzione, ha introdotto una discontinuità metodologica profonda. Non si tratta semplicemente di migliorare la precisione metrica o arricchire il repertorio grafico: la modernità cartografica ha integrato l'interattività come proprietà intrinseca dello strumento. Grazie alle funzionalità *query-based*, il GIS è una «carta parlante» e interrogabile, che consente al fruitore di estrarre informazioni specifiche su richiesta: visualizzare, a esempio, indicatori socio-demografici relativi a una determinata unità territoriale con un cursore su mappa. Questa possibilità rompe la linearità informativa della mappa tradizionale e innesta l'atto cartografico entro un flusso dinamico dove dati eterogenei possono essere correlati in tempo reale; la componente tecnologica moderna estende ulteriormente le potenzialità della cartografia con piattaforme digitali come Google Maps, OpenStreetMaps o Google Earth: sebbene nate con finalità commerciali e orientate soprattutto alla navigazione stradale o all'esplorazione visuale (Betti, Borghi, Virgini, 2023; La Foresta, 2025), tali strumenti hanno influenzato profondamente la

percezione collettiva dello spazio. Esse introducono elementi iconografici fluidi (*street view*, fotografie geolocalizzate), accrescendo il valore esperienziale ma rischiando anche di deviare verso una spettacolarizzazione della spazializzazione più che verso un'elaborazione critica coerente con la territorializzazione disciplinare. La transizione dal tradizionale al moderno si accompagna a nuove sfide epistemologiche. In primo luogo, il successo dell'interattività pone questioni sulla validazione delle fonti: l'integrazione automatica di *dataset* provenienti da differenti enti e livelli normativi comporta rischi legati a incoerenze metriche o *bias* culturali (Casti, 2008). Per il geografo, e ancor più nel contesto didattico innovativo, diventa imprescindibile esercitare letture meta-informative sui *layer* utilizzati: ogni scelta grafica o scalare influisce sull'interpretazione dei processi osservati. Parallelamente emerge la questione dell'alfabetizzazione cartografica digitale; se negli approcci più classicamente scolastici prevaleva l'imparare a leggere la cartografia analogica, oggi occorre formare utenti in grado di manipolare attivamente mappe interattive complesse, comprendendo operazioni quali filtraggio tematico dei livelli o impostazioni proiettive differenti per visualizzare distorsioni metriche. Questa competenza risulta cruciale per evitare che l'apparente facilità d'uso degli strumenti moderni mascheri difficoltà concettuali nell'interpretazione corretta della spazializzazione. La normativa scolastica recente incentiva l'impiego formativo della cartografia moderna proprio per il suo potere di stimolare curiosità e attenzione attraverso interfacce dinamiche³⁶ (MIUR, 2018), ma avverte sulla necessità di integrare queste esperienze con momenti critici volti ad evidenziare implicazioni culturali e politiche della rappresentazione.

Sul versante pedagogico emerge dunque la convergenza tra pratiche osservative indirette basate su carte tradizionali (utili per stabilire i fondamentali metrici e simbolici) e nuove modalità esplorative digitali e interattive, capaci di articolare su più scale dati ambientali ed economico-sociali. Il nesso operativo consiste nell'usare la solidità convenzionale della

³⁶ Le «Indicazioni nazionali e nuovi scenari, 2018» sottolineano l'importanza e invitano all'utilizzo di uno specifico linguaggio della geo-graficità e all'uso di strumenti digitali per l'osservazione indiretta.

prima per fornire impalcatura concettuale alla lettura problematizzata della seconda; in altri termini, senza padroneggiare i codici consolidati della cartografia classica si rischia superficialità nell'utilizzo critico degli strumenti contemporanei. È necessario, infine, riconoscere che anche la cartografia moderna porta con sé effetti collaterali sul piano interpretativo: la rapidità dell'aggiornamento può indurre un'impressione fallace di immediata corrispondenza tra rappresentazione digitale e realtà empirica; tuttavia molti fenomeni complessi, specialmente quelli legati a mutamenti socio-culturali, non sono immediatamente visibili nelle banche dati integrate.

Esiste il rischio concreto che l'osservazione indiretta digitale si trasformi in una fruizione passiva di immagini spettacolari (l'effetto "wow" di Google Earth) priva di profondità critica. È necessario, dunque, educare a una "alfabetizzazione geo-spaziale" che insegni a decostruire l'immagine satellitare e la carta digitale, comprendendone i meccanismi di produzione, le scale di riferimento e i margini di errore. Come nota ancora Trimarchi, «un corso di geografia a nostro parere non può prescindere dall'uso delle moderne tecniche di trasmissione ed elaborazione dell'informazione» (Trimarchi, 2003), ma queste devono essere inserite in un quadro epistemologico che ne valorizzi la funzione di mediazione cognitiva e non di mero sostituto della realtà (Poli, 2011-c). La territorializzazione richiede pertanto un atto analitico che vada oltre il dato presentato graficamente: correlare fonti multiple, verificare dirette sul campo tramite l'osservazione diretta, integrazione di testimonianze locali. La dialettica tra cartografia tradizionale e moderna si configura, così, non come semplice, quanto ovvia, sostituzione tecnologica bensì come intersezione critica fra stabilità codificata e dinamicità interattiva; riuscire a mediare questi poli nel contesto educativo significa garantire allo studente competenze stratificate che gli permettano tanto l'uso consapevole degli strumenti digitalizzati quanto la comprensione profonda dei principi formali ed epistemici alla base dell'atto cartografico stesso.

3.4 L'Osservazione Geografica Immersiva (OGI): un nuovo paradigma tra reale e virtuale

L'avvento delle tecnologie di Realtà Estesa (XR) – comprendenti Realtà Virtuale (VR), Realtà Aumentata (AR) e Realtà Mista (MR) – segna un passaggio epocale (Luzzi et al., 2024): partendo dall'osservazione diretta, a quella bidimensionale (la mappa) e distale (il satellite) fino ad arrivare a una forma ibrida che questo lavoro di ricerca sintetizza come Osservazione Geografica Immersiva (OGI). Questo nuovo paradigma non si limita a fornire una rappresentazione più realistica del mondo, ma altera la stessa ontologia dell'oggetto geografico e la posizione del soggetto osservante. Nell'OGI, l'osservatore non è più di fronte al paesaggio, ma dentro di esso, immerso in una simulazione che sollecita il sistema percettivo-motorio riproducendo la presenza (*sense of presence*).

Nell'attuale panorama didattico e di ricerca geografica, l'assetto tecnologico che si potrebbe associare all'osservazione immersiva si articola in un insieme eterogeneo di dispositivi e piattaforme che consentono di integrare la percezione diretta del territorio con forme avanzate di simulazione e interattività digitale. Realtà Aumentata (AR), Realtà Virtuale (VR) e Realtà Mista (MR) non costituiscono semplicemente varianti tecniche della spazializzazione mediata, ma rappresentano paradigmi distinti nella relazione tra soggetto osservatore e oggetto geografico osservato; ciascuno introduce specifiche modalità di territorializzazione digitale, condizionando il grado di continuità o discontinuità rispetto alla dimensione empirica dell'esperienza (Zanolin, Gilardi, De Lucia, 2017; Çöltekin et al. 2020; Li, 2024). Le soluzioni basate su AR si distinguono per la capacità di sovrapporre in tempo reale strati informativi geo-referenziati alla percezione fisica dello spazio vissuto; questa sovrapposizione può includere dati di diversa natura, tridimensionali, socio-demografici o elementi cartografici tematici. L'operatività dell'AR deriva dal mantenimento di un legame strutturale con l'ambiente reale: la spazializzazione avviene su coordinate concrete, evitando – almeno potenzialmente – la disconnessione percettiva insita nella VR integrale (Betti, Borghi, Virgini,

2023). In ambito educativo, l'efficacia dell'AR dipende dalla precisione del posizionamento dei *layer* informativi e dalla validazione delle fonti sottostanti; senza un adeguato controllo meta-informativo si rischia una rappresentazione artefatta, dove l'affidabilità scientifica è sacrificata a favore della suggestione visiva. La VR, al contrario, isola l'osservatore in ambienti completamente simulati: in questo caso la spazializzazione si realizza entro scenari modellizzati secondo parametri predefiniti, configurando uno scarto ontologico radicale tra esperienza sensoriale e territorio empirico. Il vantaggio analitico della VR risiede nella possibilità di ricreare condizioni ambientali difficili da osservare direttamente – eventi estremi, proiezioni geografiche future – o ricostruire contesti storici scomparsi. Dal punto di vista epistemologico, la VR richiede protocolli obbligatori di verifica incrociata: le ipotesi interpretative generate nello spazio virtuale devono essere sottoposte a confronto con dati raccolti sul campo per evitare reificazioni concettuali fondate su modelli privi di riscontro empirico. La *Mixed Reality* (MR) si pone come sintesi operativa fra Realtà Aumentata e Virtuale, permettendo l'interazione simultanea con elementi fisici reali e oggetti digitali posizionati nello spazio; questa soluzione appare particolarmente adatta alla Didattica della Geografia complessa poiché consente sia l'esplorazione simulativa sia il mantenimento del contatto materiale con il territorio. La territorializzazione prodotta dalla MR è intrinsecamente ibrida: la combinazione fra *input* reali e virtuali genera rappresentazioni composite che devono essere governate da criteri chiari di separazione semantica tra ciò che proviene dall'osservazione diretta e ciò che è elaborato sinteticamente. Ancor più che per AR/VR, la Realtà Mista impone una gestione meticolosa delle scale informative per evitare interferenze cognitive nella transcalarità dell'analisi. Va altresì considerata la pluralità degli ambienti software che supportano queste tecnologie immersive. Piattaforme *open-source* GIS dotate di *plugin* per visualizzazioni tridimensionali in AR o MR offrono un vantaggio strategico: garantiscono adattabilità culturale alle specificità territoriali locali ed evitano dipendenze da licenze proprietarie rigide. L'utilizzo integrato con archivi open-data consente inoltre un controllo più trasparente sui processi algoritmici impiegati per la spazializzazione digitale; ciò è cruciale

per prevenire *bias* geopolitici impliciti nelle banche dati istituzionali. Tale apertura tecnologica risponde anche alle prescrizioni normative sulla riduzione dei divari infrastrutturali: adottare strumenti liberi facilita l'equità nell'accesso alle risorse immersive fra contesti scolastici disomogenei (Commissione Europea, 2023; Betti, Borghi, Virgini, 2023). Dal lato *hardware*, le tecnologie disponibili spaziano dai visori standalone (capaci di operare senza connessione a PC dedicati) ai sistemi *tethered* ad alta definizione grafica; in ambito AR/MR si diffondono occhiali intelligenti dotati di sensori volumetrici in grado di riconoscere superfici e movimenti nello spazio, mentre soluzioni più accessibili sfruttano smartphone o tablet equipaggiati con fotocamere stereoscopiche per il calcolo della profondità. La scelta del dispositivo non è neutra rispetto alla qualità dell'analisi geografica prodotta: la fedeltà metrica della rappresentazione immersiva dipende direttamente dalla precisione dei sensori ambientali utilizzati; hardware a basso costo può introdurre errori significativi nel posizionamento degli elementi virtuali rispetto al reale. Pertanto ogni applicazione didattica avanzata deve includere una stima esplicita delle tolleranze metriche ammesse nella visualizzazione. Gli ambienti collaborativi immersivi meritano una riflessione specifica: piattaforme WebVR o WebAR permettono sessioni sincrone fra più utenti distribuiti geograficamente³⁷ (Li, 2024), i quali possono co-interagire con gli stessi oggetti territorializzati digitalmente; in contesto educativo, questa funzionalità favorisce esercizi condivisi sulla transcalarità: gruppi situati in luoghi differenti possono sovrapporre osservazioni locali a modelli macro-territoriali comuni. Tali dinamiche collaborative, tuttavia, pongono problemi giuridici rilevanti sulla protezione dei dati georeferenziati inseriti dagli utenti stessi (Adel, 2020); serve dunque implementare protocolli sicuri per anonimizzare contributi sensibili prima della loro pubblicazione live in ambiente immersivo. Un aspetto metodologico critico riguarda il rischio del “realismo convincente”: quanto più alta è la fedeltà visuale delle tecnologie immersive tanto maggiore è la possibilità che lo studente accetti implicitamente i modelli

³⁷ Esempi includono piattaforme come Mozilla Hubs o A-Frame, che permettono esperienze VR accessibili via browser senza installazione software.

presentati come neutri ed esaustivi. Questo fenomeno impone pratiche sistematiche di *de-briefing* critico dopo le attività immersive: momenti dedicati a esplicitare assunzioni teoriche incorporate nel modello digitale aiutano a prevenire derive interpretative superficiali (Schwaiger et al., 2024). La qualità formativa dell'esperienza immersiva dipende in ultima analisi dalla capacità del docente-facilitatore di guidare lo studente nella distinzione fra evidenza empirica e rappresentazione modellizzata dello spazio geografico. Il ventaglio delle tecnologie immersive oggi disponibili offre potenzialità considerevoli per ampliare gli orizzonti dell'osservazione geografica complessa; tuttavia tali strumenti richiedono disciplina metodologica rigorosa nell'integrazione tra componentistica tecnica e quadro epistemologico della spazializzazione (Poli, 2011-c).

In ambito formativo questa osservazione apre a percorsi didattici più partecipativi: gli studenti possono intervenire, attraverso questi strumenti, direttamente sui parametri di un modello geografico e osservare come scelte diverse possano modificarne la struttura spaziale. Si applica, in questo modo, una territorializzazione sperimentale utile a comprendere relazioni causali complesse tra diversi elementi spaziali (La Foresta, 2025). Dal punto di vista operativo, l'integrazione fra osservazione immersiva e rilievo diretto sul campo costituisce la condizione metodologica per evitare distorsioni cognitive: attività miste che prevedano prima l'esplorazione virtuale e poi la verifica empirica permettono sia il consolidamento concettuale sia l'individuazione tempestiva di discrepanze tra modello e territorio reale (Estes, Hortas, Mendes, 2018).

Questo approccio ibrido riduce significativamente gli effetti negativi della disconnessione ontologica insita nella VR rispetto alla percezione concreta dello spazio osservato nella realtà. Sul versante infrastrutturale si evidenziano limiti rilevanti legati alla disponibilità *hardware-software*; in assenza di visori performanti, sensori volumetrici precisi o dispositivi mobili dotati di fotocamere stereoscopiche adeguate, la qualità della territorializzazione immersiva può degradare fino a produrre errori significativi nel posizionamento degli elementi

virtuali rispetto al reale (Bärthele, Sauer, Wilkening, 2023). Le soluzioni *open-source* garantiscono non solo la riduzione dei costi ma anche possibilità di adattamenti culturali locali coerenti con le specificità territoriali degli utenti. Sul piano della didattica, si possono individuare potenzialità specifiche nell'adottare ambienti MR per attività co-costruite docente-discente: tali contesti permettono simultaneità tra esplorazione simulata e manipolazione fisica reale dello spazio (es. applicando *layer* informativi su plastici planimetrici), favorendo comprensione stratificata della relazione fra materiali concreti e rappresentazioni digitali. In questa ipotesi di osservazione geografica, le tecnologie immersive ampliano le possibilità esplorative della Didattica della Geografia rendendo tangibile le diverse scale di rappresentazione, integrando processualità sistemiche direttamente nello spazio vissuto-simulato. L'efficacia formativa dell'immersività deriva dunque dalla capacità del sistema educativo e scientifico di governarne criticamente usi e rappresentazioni, evitando che seduzione visiva e immediatezza percettiva si traducano in strumenti cognitivamente impoveriti rispetto alla complessità reale dei fenomeni territorializzati.

3.5 Il gap tecnologico e didattico: perché sviluppare strumenti low cost e open-source?

Studi recenti evidenziano come la sola presenza di dispositivi non garantisca un miglioramento negli apprendimenti se non accompagnata da una progettazione pedagogica coerente e da un uso critico della tecnologia (Redecker, 2017). Questo pone in risalto il ruolo della formazione continua dei docenti, considerato elemento essenziale per la riduzione del divario (OECD, 2020).

Sul piano didattico, il gap si traduce nella difficoltà di adattare curricula e metodologie all'impiego significativo delle tecnologie emergenti. Nonostante la massiccia dotazione infrastrutturale promossa in Italia dal Piano Scuola 4.0 (D.M. 161/2022) (Ministero

dell'Istruzione, 2022), molti istituti faticano ancora a integrare tali strumenti in una cornice pedagogica che favorisca la reale personalizzazione dell'apprendimento (OECD, 2023). Il rischio è che l'investimento sugli ambienti di apprendimento (le cosiddette *Next Generation Classrooms*) si risolva in un semplice *restyling* degli spazi, senza intaccare la didattica trasmissiva tradizionale. Come evidenziato dalla ricerca educativa nazionale (INDIRE, 2023), se le risorse tecnologiche vengono utilizzate in maniera occasionale o sostitutiva, esse falliscono l'obiettivo di sviluppare quelle competenze trasversali e di cittadinanza digitale richieste dal quadro europeo, con il rischio che le risorse tecnologiche restino marginali o vengano utilizzate in maniera occasionale e poco strategica (Ananiadou, Claro, 2009; UNESCO, 2023)³⁸.

L'adozione delle tecnologie immersive e degli strumenti di analisi geospaziale avanzata nella Didattica della Geografia rappresenta oggi, come si è visto, una frontiera epistemologica irrinunciabile per la comprensione della complessità territoriale (Hazen, Alberts, 2020). Tale transizione si scontra, tuttavia, con una barriera materiale, culturale e strutturale di notevole importanza: una distanza tra le competenze digitali richieste dalla società contemporanea e quelle effettivamente sviluppate negli studenti, in gran parte legata alla disponibilità di infrastrutture adeguate, alla formazione del personale docente e alle strategie metodologiche adottate (Commissione Europea, 2023). In un'ottica scientifica e critica, tali differenze non possono essere interpretate esclusivamente con la semplice assenza di infrastrutture hardware (divario di primo livello o di accesso), ma deve essere analizzato come un fenomeno multidimensionale e stratificato che investe le competenze (*digital literacy* o divario di secondo livello) e *l'empowerment* sociale (divario di terzo livello), influenzando

³⁸ Questa difficoltà di integrazione strategica è particolarmente evidente nell'insegnamento della Geografia in Italia. Sebbene strumenti come Google Earth o i GIS offrano enormi potenzialità per lo sviluppo di competenze trasversali e spaziali, spesso vengono ridotti a semplici visualizzatori di immagini, mancando quella "progettazione pedagogica" necessaria per trasformare l'osservazione virtuale in pensiero critico sul territorio.

direttamente la qualità della cittadinanza spaziale che la scuola è chiamata a formare (Zbe-reanu, 2024).

Per comprendere la portata del fenomeno e il suo impatto sull'insegnamento della Geografia, è necessario ancorare la riflessione ai dati empirici, superando la retorica dell'innovazione *tout court*. Sebbene il Piano Nazionale Scuola Digitale (PNSD) e i massicci investimenti del PNRR (Missione 4 - Istruzione e Ricerca, Componente 1 - Potenziamento dell'offerta dei servizi di istruzione: dagli asili nido alle università) abbiano iniettato risorse significative nel sistema scolastico italiano per la creazione di ambienti di apprendimento innovativi (*School 4.0*), le rilevazioni statistiche restituiscono un quadro di persistente disuguaglianza che assume i tratti di una vera e propria "geografia del divario".

Secondo i dati ISTAT (Rapporto Cittadini, imprese e ICT, 2023), persiste una frattura territoriale significativa che ricalca le storiche dicotomie dello sviluppo italiano; nel Mezzogiorno, la percentuale di famiglie che non dispone di un computer o di un tablet in casa supera ancora il 20%, contro una media del 14% nelle regioni del Nord Italia³⁹. Questo dato, apparentemente slegato dalla didattica in aula, impatta invece in modo devastante sulle possibilità di *homeworking* e di didattica ibrida o capovolta (*Flipped Classroom*). Un docente di Geografia che intenda assegnare come compito domestico l'esplorazione di un'area tramite *Google Earth* o la realizzazione di una mappa tematica su piattaforme *WebGIS* (Kerski, 2023), di fatto esclude un quinto della popolazione scolastica meridionale, o la costringe a fruire di contenuti complessi attraverso il piccolo schermo di uno smartphone, inadeguato per l'analisi spaziale profonda. Ancor più allarmante è il dato relativo alle competenze digitali, monitorato dall'indice *Digital Economy and Society Index* (DESI) della Commissione Europea. L'Italia si colloca costantemente nelle ultime posizioni tra i 27 Stati membri per

³⁹ Cfr. ISTAT. (2023). *Cittadini, imprese e ICT - Anno 2023*. Roma: Istituto Nazionale di Statistica. I dati dell'indagine multiscopo "Aspetti della vita quotidiana" evidenziano come il divario digitale infrastrutturale e il possesso di *device* (computer o tablet) rimangano marcati tra le ripartizioni geografiche, penalizzando il Mezzogiorno rispetto alla media del Centro-Nord.

quanto riguarda la dimensione del “Capitale Umano”: solo il 46% degli individui tra i 16 e i 74 anni possiede competenze digitali di base (contro una media UE del 54%). Traslando questo dato nel contesto scolastico, emerge che una quota rilevante di studenti – e, criticamente, di docenti – manca dell’alfabetizzazione necessaria per gestire non tanto lo strumento tecnico, quanto la logica algoritmica sottesa agli ambienti digitali complessi come i GIS o le piattaforme di Realtà Virtuale.

In questo scenario, l’avvertimento di Fini assume una valenza profetica e sociologica cruciale, evidenziando il paradosso dell’apertura: «L’intento di condividere conoscenza attraverso la rete potrebbe in realtà implicare un ulteriore aggravamento del *digital divide* [...] per cui i corsi *open* sarebbero in realtà accessibili soltanto ad alcuni strati sociali» (Fini, 2012). L’introduzione acritica di tecnologie immersive costose (visori VR *stand-alone* di fascia alta, come Meta Quest o HTC Vive, dal costo superiore ai 500€ per unità) rischia dunque di polarizzare il sistema scolastico italiano tra “scuole di serie A”, situate in contesti socio-economici favorevoli e capaci di offrire esperienze di *virtual fieldwork* e analisi spaziale avanzata, e “scuole di serie B”, ancorate a una didattica analogica non per scelta pedagogica ragionata, ma per indigenza economica strutturale.

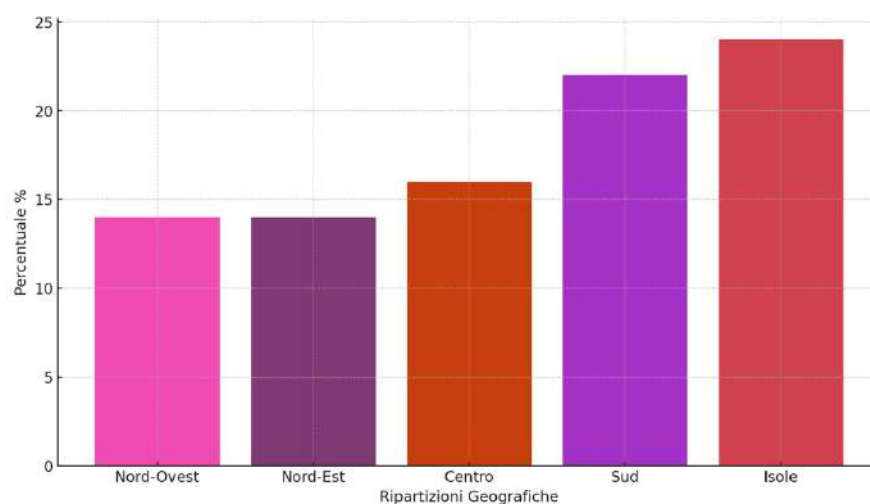


Figura 2 Grafico sul Digital Divide Regionale in Italia (famiglie senza accesso a PC/Tablet. La geografia del divario digitale ricalchi una forma di “questione meridionale”, ponendo seri limiti all’universalità della didattica digitale domestica. Rielaborazione su dati ISTAT dell’autore.

Il divario più insidioso per l’epistemologia geografica non è tuttavia quello *dell’hardware*, risolvibile con investimenti economici (divario di primo livello), ma quello metodologico e formativo (divario di secondo livello). La sola presenza di *Interactive Flat Panels* (monitor interattivi come le LIM) nelle aule non garantisce, *ipso facto*, innovazione didattica se non accompagnata da una specifica competenza disciplinare del docente nell’uso pedagogico delle geotecnologie.

I dati OCSE-TALIS (*Teaching and Learning International Survey*) confermano che, sebbene i docenti italiani partecipino a numerosi corsi di formazione, una percentuale elevata (superiore al 30%) dichiara un forte bisogno di formazione specifica sulle competenze digitali per l’insegnamento (*ICT for teaching*). Nel caso specifico della geografia, questo si traduce spesso in un uso passivo e frontale delle tecnologie: *Google Earth* viene utilizzato come un “super-atlante” per mostrare immagini spettacolari, ma raramente come strumento di misura, analisi e interrogazione del territorio. Mastronunzio e Martellozzo denunciano con lucidità questa situazione, individuando nella formazione iniziale il peccato originale: «La diffusa carenza di preparazione dell’insegnante è al contempo causa ed effetto di una

insufficiente cultura geografica [...] Come si può insegnare geografia quando questa viene relegata esclusivamente agli insegnamenti accademici [...]?» (Mastronunzio, Martellozzo, 2007). La critica degli autori riguarda il fatto che, senza una solida base epistemologica, la tecnologia diviene un orpello inutile o addirittura dannoso. Trimarchi sottolinea vigorosamente che l'introduzione dell'informatica non può prescindere da una rifondazione pedagogica: «Il confronto tra informatica e didattica non può avvenire senza una seria riflessione che coinvolga pienamente la pedagogia [...] Accogliere il computer o anche il videoregistratore non come presenze aliene, né come ripetitori di un copione già dato, ma come campi altrettanto naturali per l'azione e l'esplorazione cognitiva» (Trimarchi, 2003). Si ribadisce che il computer non deve essere un «ripetitore», ovvero uno strumento che replica le logiche della lezione trasmissiva (il docente parla, il computer mostra), ma un ambiente di «esplorazione cognitiva» dove lo studente costruisce il sapere. Senza questa cornice, il gap didattico vanifica qualsiasi investimento infrastrutturale, riducendo la geografia digitale a un tecnicismo sterile o a un intrattenimento visuale (“effetto wow”) privo di profondità analitica e critica.

Tabella 3. Tipologia di utilizzo delle tecnologie geografiche. Elaborazione dell'autore.

Livello di Utilizzo	Approccio Didattico	Ruolo dello Studente	Esempio Tecnologico	Valore Epistemologico
Passivo/Visuale	Trasmissivo	Spettatore	Proiezione LIM di Google Earth	Basso (Descrittivo)
Interattivo	Laboratoriale guidato	Esecutore	Ricerca luoghi, calcolo distanze	Medio (Procedurale)
Costruttivista/Immersivo	Problem-Based Learning	Ricercatore	Creazione mappe GIS, Storytelling con VR	Alto (Interpretativo/Critico)

Un aspetto spesso trascurato nell'analisi del gap tecnologico è la natura epistemologica del software utilizzato. La prevalenza di software proprietari (commerciali) nella scuola crea una dipendenza cognitiva e finanziaria da specifici *vendor*, educando gli studenti a essere “clienti” piuttosto che cittadini digitali consapevoli. In Geografia, l'uso esclusivo di piattaforme proprietarie (spesso opache nei loro algoritmi di funzionamento, definite “*Black Box*”)

rischia di nascondere i processi di costruzione della carta. Quando uno studente utilizza un'applicazione digitale commerciale di navigazione, accetta passivamente il percorso calcolato dall'algoritmo; quando utilizza un GIS, deve invece decidere quali parametri pesare per l'analisi.

L'adozione di software *open-source* e *low-cost* risponde quindi a un'esigenza di trasparenza scientifica. Come nota Fini, nel contesto delle Risorse Educative Aperte (OER): «La conoscenza è un bene pubblico e [...] la tecnologia in generale e il World Wide Web in particolare, offrono a tutti una straordinaria opportunità di condividere, utilizzare e riutilizzare tale conoscenza» (Fini, 2012). La Geografia attraverso tecnologie *open-source* (es. l'uso di QGIS, OpenStreetMap) permette di “aprire la scatola”, di vedere come i dati vengono raccolti, processati e rappresentati. Questo è fondamentale per sviluppare quel pensiero critico che Castelnovi (2017) invoca quando ricorda che «il sapere è potere» e che la conoscenza geografica è storicamente servita per il controllo del territorio. Utilizzare strumenti aperti significa restituire questo potere di analisi alla comunità scolastica.

Di fronte a queste asimmetrie strutturali e formative, lo sviluppo e l'adozione di strumenti *low-cost* e *open-source* (FOSS) non rappresentano una strategia di ripiego o di “austerità educativa”, ma un imperativo etico e politico per una geografia democratica. Il movimento delle OER offre un modello sostenibile che si contrappone alla mercificazione del sapere. Si evidenzia come, nel contesto della disintermediazione digitale, la produzione attiva di contenuti migliori la qualità dell'apprendimento: «La pubblicazione di contenuti aperti implichi intrinsecamente una maggiore attenzione da parte di chi li produce, con un conseguente vantaggio anche in termini qualitativi» (Fini, 2012).

Applicare questo principio alla Geografia significa trasformare lo studente da utente passivo a *prosumer* (produttore-consumatore) (Figura 3) di dati territoriali. Una possibile proposta,

pensata per discenti delle scuole secondarie, potrebbe seguire tre punti operativi collegati a tre *outcome* specifici del processo di insegnamento-apprendimento geografico:

1. Analisi Spaziale Democratica. L'adozione di QGIS (*software* libero e gratuito) al posto di costose licenze commerciali permette a ogni studente di installare il laboratorio geografico sul proprio computer personale (nella logica della metodologia *BYOD - Bring Your Own Device*⁴⁰). Questo abbate il divario di accesso e consente la continuità didattica scuola-casa.
2. Cartografia digitale collaborativa (OpenStreetMap). Partecipare a progetti di mappatura su OpenStreetMap ha un valore educativo immenso. Gli studenti non si limitano a consultare una mappa, ma mappano il proprio territorio, inserendo edifici, strade o elementi di barriera architettonica. Questo esercizio di *neogeography* sviluppa la competenza di osservazione diretta e la responsabilità civica (Educazione Civica).
3. Osservazione Geografica Immersiva (OGI). Sul versante delle tecnologie immersive, la strategia *low cost* si concretizza nell'uso di visori passivi economici che sfruttano lo smartphone dello studente come motore di calcolo e giroscopio. Questo approccio democratizza l'accesso alla Realtà Virtuale (VR), rendendo possibili esperienze di *embodiment* geografico⁴¹ e di esplorazione di luoghi remoti anche in contesti scolastici svantaggiati, senza gravare sui bilanci d'istituto.

⁴⁰ Con l'acronimo BYOD (*Bring Your Own Device*, letteralmente "porta il tuo dispositivo") si designa una strategia organizzativa e metodologica che consente agli utenti – siano essi dipendenti di un'azienda o studenti in un contesto formativo – di utilizzare i propri dispositivi elettronici personali (smartphone, tablet, laptop) per accedere alle reti, ai dati e alle risorse dell'organizzazione, integrandoli nelle attività lavorative o di apprendimento formale. Tale approccio, segnando un passaggio dal modello "uno-a-uno" fornito dall'istituzione a un modello *user-centric*, mira a sfruttare la familiarità dell'utente con il proprio strumento per incrementare flessibilità, personalizzazione e continuità operativa tra contesti formali e informali.

⁴¹ Il concetto di *Embodiment* postula che i processi cognitivi siano profondamente radicati nelle interazioni sensomotorie del corpo con il mondo. Nell'ambito della Didattica della Geografia mediata da tecnologie immersive (VR), l'*Embodiment* spiega l'efficacia dell'apprendimento attraverso il "senso di presenza": la tecnologia permette di simulare l'esperienza fisica dello spazio, attivando circuiti neurali analoghi a quelli dell'esplorazione reale e favorendo una comprensione profonda e "situata" del territorio, altrimenti inaccessibile tramite la sola cartografia tradizionale (Giorda, 2014).

GEOGRAFIA DEMOCRATICA: IL MODELLO PROSUMER

Trasformare lo studente da **UTENTE** (Passivo) a **PROSUMER** (Produttore di Dati) attraverso Software Open Source e Hardware Low Cost



Figura 3. Il modello della Geografia Democratica. Elaborazione dell'autore⁴²

Tentare di colmare il gap tecnologico rilevato nella scuola italiana attraverso soluzioni accessibili e aperte è l'unica via per garantire che l'innovazione didattica in Geografia sia equa, scientificamente fondata e costituzionalmente orientata (art. 3 e art. 34 della Costituzione). Come nota Zanolin, l'obiettivo finale non è la competenza tecnica, ma la capacità di attribuire senso ai luoghi: «Il fatto che un luogo sia in un posto preciso diventa funzionale alla comprensione dei significati che esso può esprimere come conseguenza di una relazione “territorializzante” tra uomini e natura» (Zanolin, 2017). Le tecnologie *low-cost* e *open-source*, rimuovendo le barriere d'accesso e svelando i meccanismi di funzionamento, permette di focalizzare l'attenzione su questa relazione territorializzante, piuttosto che sullo strumento in sé. La sfida per la didattica della Geografia del futuro non è inseguire l'ultima tecnologia proprietaria, ma abilitare gli studenti a diventare produttori consapevoli di

⁴² L'infografica illustra il passaggio dallo studente come utente passivo a *prosumer* (produttore-consumatore) attraverso l'adozione di tecnologie Open Source e Low Cost. Vengono delineati tre ambiti operativi: l'analisi spaziale tramite QGIS e BYOD per abbattere il *digital divide*; la cartografia collaborativa con OpenStreetMap per sviluppare competenze di cittadinanza attiva; l'osservazione immersiva tramite VR economico per favorire l'inclusione e l'*embodiment* geografico.

rappresentazioni spaziali, capaci di usare lo smartphone non come un semplice schermo, ma come una “lente aumentata” per leggere e scrivere il mondo. La scelta dell’*open-source* diviene così una scelta di campo precisa: contro la mercificazione del dato geografico, per una conoscenza spaziale intesa come bene comune.

SECONDA PARTE: PROGETTARE, SVILUPPARE E PROTOTIPARE GEOTECNOLOGIE IMMERSIVE

4. Metodologie di progettazione e sviluppo di una Sandbox AR e dei suoi *upgrades*

4.1 Stato dell'arte delle geotecnologie per la didattica: una review dei prodotti esistenti

Il panorama attuale delle soluzioni basate su Realtà Aumentata (AR) e Realtà Virtuale (VR) applicate alla didattica evidenzia differenze sostanziali in termini di obiettivi, modalità d'interazione e contesti operativi. Le piattaforme VR immersive offrono ambienti completamente simulati in cui l'utente è isolato dal contesto fisico e può interagire con modelli e dati in assenza di distrazioni visive esterne; questo approccio si rivela utile per la formazione tecnica avanzata o per la visualizzazione di scenari non riproducibili fisicamente, come la simulazione di reti infrastrutturali o tecniche, o spazi non propriamente terrestri (Wagner, Alharthi, 2023). Al contrario, le soluzioni AR arricchiscono la percezione del mondo reale con elementi digitali sovrapposti, preservando il legame con l'ambiente circostante e consentendo un apprendimento situato, che appare particolarmente adatto laddove l'osservazione diretta è parte integrante dell'attività formativa (Turk, Balcik, 2023).

L'analisi comparativa, supportata dallo stato dell'arte in merito all'utilizzo delle tecnologie in classe (Schmidt, Stumpe, 2025; Panjaitan, Ningrum, Waluya, 2023), mostra che le applicazioni AR risultano più immediate per introdurre concetti complessi nella didattica di base o secondaria, grazie alla possibilità di interagire fisicamente con l'ambiente continuando a ricevere stimoli informativi contestuali: a esempio, applicazioni che permettono la visualizzazione tridimensionale della struttura della Terra in classe, forniscono uno strumento accessibile per superare le difficoltà legate all'astrazione concettuale tipica della fisica nucleare. In questi casi l'esperienza si basa sulla manipolazione di modelli tridimensionali ancorati nello spazio reale, facilitando sia l'apprendimento concettuale sia la memorizzazione

a lungo termine dei contenuti (Arymbekov et al., 2024). Le piattaforme VR tendono invece a essere preferite per scenari in cui il livello di immersione totale costituisce un valore aggiunto irrinunciabile (Bujdosó et al., 2019).

Dal punto di vista tecnologico, entrambe le soluzioni condividono esigenze comuni quali la modellazione 3D accurata, motori fisici e componenti *hardware* capaci di garantire tracciamento preciso e bassa latenza. La VR, tuttavia, richiede sistemi più performanti dal lato grafico e sensoriale per generare ambienti totalmente renderizzati senza cali qualitativi percepibili dall'utente (Wagner, Alharthi, 2023), mentre l'AR deve affrontare sfide legate all'allineamento spaziale in tempo reale tra oggetti virtuali e reali. Questa distinzione si riflette anche nella scelta delle piattaforme *software*: sistemi come *Unity* o *Unreal Engine* sono comuni a entrambe le tecnologie, ma nel caso AR devono essere combinati con SDK specifici come ARCore o ARKit per sfruttare capacità di riconoscimento spaziale su dispositivi mobili (Pavlova et al., 2023). Sul piano dell'esperienza collaborativa, emergono differenze interessanti; la VR offre spazi virtuali condivisi che replicano fedelmente ambienti fisici collaborativi tradizionali ma con potenziamenti difficilmente ottenibili nello spazio reale: manipolazione simultanea di dati complessi, teletrasporto tra scenari diversi, comunicazione non verbale mediata da avatar (Li, 2024). L'AR, invece, permette interazioni collaborative direttamente nell'ambiente reale arricchito, rendendo possibile discutere davanti a un modello tridimensionale proiettato sul banco da lavoro o nel laboratorio scolastico senza alcuna separazione percettiva dal contesto fisico. Un ulteriore criterio comparativo riguarda i costi operativi: molti istituti educativi percepiscono i dispositivi VR economicamente meno accessibili rispetto all'utilizzo diffuso di smartphone o tablet già presenti negli ambienti AR. Il costo elevato dell'*hardware* VR può rappresentare una barriera iniziale importante soprattutto nei contesti scolastici pubblici privi di ampi *budget* da destinare alla tecnologia. L'AR, viceversa, ha il vantaggio della scalabilità economica: anche se soluzioni avanzate prevedono visori ottici dedicati, molte funzionano su dispositivi *consumer* già disponibili nelle

scuole⁴³. L'efficacia educativa dipende comunque dalla qualità dei contenuti sviluppati e dalla loro adeguatezza rispetto agli obiettivi formativi; studi condotti su insegnanti mettono in luce che una parte consistente del corpo docente manifesta curiosità verso soluzioni XR a patto che siano supportate da opportune azioni formative interne e accesso facilitato alle risorse tecniche necessarie (Figura 4).

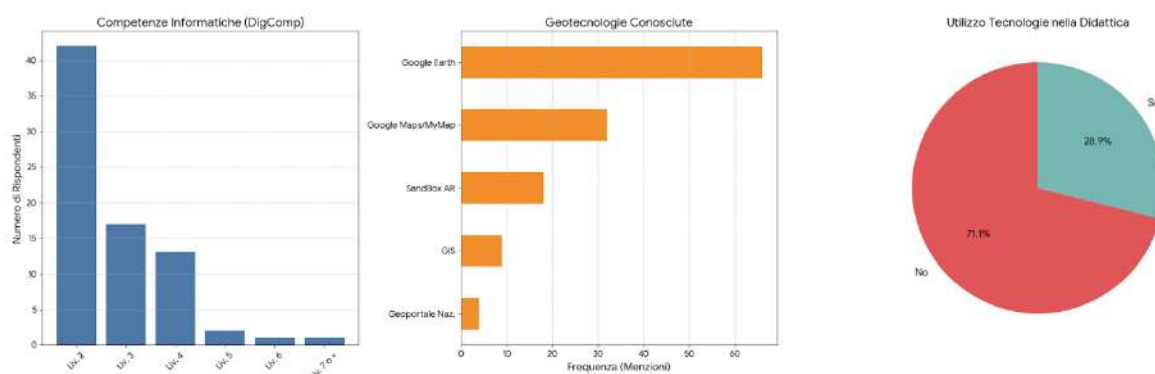


Figura 4. Confronto tra il livello di competenze informatiche (prevalentemente intermedio), la diffusione delle geotecnologie (con una netta predominanza di soluzioni consumer come Google Earth/Maps) e l'effettivo utilizzo nella didattica, che mostra ancora un divario tra potenziale e pratica. Elaborazione dell'autore.

La predisposizione positiva verso VR/AR sembra crescere soprattutto quando queste tecnologie sono integrate in laboratori dedicati dove personale tecnico fornisce assistenza continua durante le sessioni didattiche. Non mancano però resistenze legate alla percezione della qualità didattica: alcuni docenti temono che l'impiego massivo possa ridurre l'efficacia dell'insegnamento tradizionale o amplificare effetti negativi sull'attenzione degli studenti (Schwaiger et al., 2024). Questo indica la necessità di un bilanciamento attento nell'introduzione delle tecnologie immersive nei curricula scolastici, tenendo conto dei limiti cognitivi legati a sovraccarichi percettivi o alle curve di apprendimento delle interfacce stesse. La comparazione suggerisce quindi una complementarità piuttosto che una competizione diretta

⁴³ I riferimenti all'economicità dei dispositivi consumer quali quelli di META, Meta Quest, sono da riferirsi a sistemi complessi pensati per la Ricerca e Sviluppo in campo ingegneristico o di progettazione. I dispositivi che, viceversa, iniziano a essere presenti nelle scuole hanno come prima finalità il gaming: per questo risultano più facilmente utilizzabili e scalabili anche nelle attività didattiche.

fra AR e VR nell'ambito educativo: soluzioni ibride XR/MR stanno emergendo proprio per combinare i punti di forza delle due tecnologie: immersività completa quando necessario e connessione diretta al contesto reale quando utile (Li, 2024). Questa convergenza tecnologica apre possibilità interessanti anche per geotecnologie immersive come la Sandbox AR evoluta verso Streambox AR – principale upgrade del progetto di ricerca –, dove modelli geologici dinamici possono essere fruiti tanto in spazi reali aumentati quanto in simulazioni totalmente virtualizzate a seconda dello scenario formativo richiesto.

L'impiego di applicazioni immersive nella Didattica della Geografia sta assumendo un ruolo sempre più concreto nella creazione di ambienti educativi interattivi, dove questa disciplina non è soltanto descritta o rappresentata in forma cartacea, ma esperita attraverso modelli tridimensionali integrati con dati reali. Questo tipo di approccio sembra particolarmente adatto a materie che richiedono l'analisi di territori complessi, poiché consente di combinare la percezione diretta degli allievi con simulazioni avanzate che riproducono fenomeni dinamici come variazioni meteorologiche, cambiamenti idrografici o trasformazioni antropiche della superficie terrestre (Arymbekov et al., 2024). La Realtà Aumentata, a esempio, offre la possibilità di sovrapporre livelli informativi su mappe fisiche, illuminando dettagli come densità demografica o distribuzione delle risorse naturali direttamente sul supporto reale; nel contesto scolastico ciò significa rendere visibile il legame tra spazi studiati e spazi abitati, riducendo lo scarto cognitivo fra dati astratti e loro contestualizzazione spaziale. Rispetto ai modelli tradizionali che si basano su cartografia statica o fotografie aeree, le tecnologie immersive permettono di integrare nel processo formativo anche fonti di dati provenienti da rilevamenti di diversa natura, come da droni (UAV) o sensori ambientali. L'uso di sistemi UAV per registrare visualizzazioni aeree con informazioni spaziali e temporali consente agli studenti di analizzare territori da prospettive multiple e comprendere meglio le relazioni tra infrastrutture e conformazione del paesaggio: la capacità di zoomare sui dettagli rilevanti o di osservare aree potenzialmente pericolose senza esposizione diretta al rischio aggiunge una dimensione pratica alla lezione di Geografia che nei metodi tradizionali rimane

completamente astratta (Nex, Remondino, 2014). I docenti possono utilizzare queste registrazioni per far discutere gli studenti sulle implicazioni ambientali o geotecniche rilevate nelle analisi collaborative.

Le applicazioni immersive possono assumere la forma di sistemi AR integrati con sistemi informativi geografici (GIS) per fornire piattaforme complete in cui interrogare dati territoriali su diverse scale; l'aggiunta della componente interattiva permette agli studenti non solo di osservare ma anche di intervenire su modelli geomorfologici, variando parametri e osservandone le conseguenze simulate: modificando l'altitudine media di un bacino idrografico aumentato si possono, a esempio, simulare effetti sulla portata fluviale o sulla formazione di laghi artificiali. Questo tipo di esperimento virtuale può essere particolarmente utile in unità didattiche dedicate alla gestione delle risorse idriche o allo studio del rischio idrogeologico. La visualizzazione immediata dei risultati facilita la comprensione delle complesse connessioni tra elementi naturali e intervento umano (Pavlova et al., 2023). La crescita dell'interesse verso piattaforme XR ha incoraggiato anche lo sviluppo di *toolkits* specifici per l'ideazione immersiva in ambito geografico; strumenti come UXR-kit favoriscono l'emergere di idee applicative grazie a rappresentazioni «*World-In-Miniature*»⁴⁴ che consentono agli studenti di esplorare paesaggi su piccola scala ma accurati prima del passaggio alla scala reale (Vauchez et al., 2023). Questa modalità riduce il carico percettivo iniziale e permette sessioni formative incrementalmente più complesse. In un'aula scolastica, un compito potrebbe consistere nell'interagire con un modello in miniatura dell'area urbana locale per poi

⁴⁴ Il concetto di *World-In-Miniature* (WIM) rappresenta una metafora di interazione fondamentale per gli ambienti virtuali (VR), teorizzata originariamente nel campo della *Human-Computer Interaction* da Stoakley, Conway e Pausch (1995). A differenza della navigazione tradizionale in prima persona (egocentrica), dove l'utente è vincolato a una scala 1:1. Nel contesto educativo citato (Vauchez et al., 2023), questa modalità assume un valore pedagogico specifico definito *multiscalare*. Essa riduce il carico cognitivo permettendo allo studente di acquisire una visione d'insieme della morfologia del territorio (es. bacini idrografici, orografia) prima di effettuare il "salto" immersivo alla scala reale per l'analisi di dettaglio. Il WIM agisce dunque come ponte cognitivo tra l'astrazione della mappa topografica e la concretezza dell'esperienza sul campo.

confrontarlo con la mappa aumentata completa, identificando differenze significative ed effettuando ipotesi su cause e conseguenze.

Dal punto di vista dell'efficacia didattica, la letteratura indica che AR e VR possono incidere positivamente sull'acquisizione delle competenze operative applicate alla Geografia se accompagnate da adeguate forme di *training* preliminare⁴⁵. Nelle discipline spazialmente orientate, questa preparazione dovrebbe includere familiarità con sistemi di cartografia digitale – Google Maps, Google Earth, OpenStreetMaps – e capacità base nel riconoscimento topografico così da sfruttare pienamente il potenziale delle visualizzazioni aumentate. Lo stato dell'arte mostra anche una stretta correlazione tra inclinazione personale verso l'innovazione tecnologica e maggiore propensione all'uso efficace delle applicazioni immersive in contesto educativo geografico; gli insegnanti più innovativi tendono a sperimentare moduli che includono misurazioni sul campo integrate direttamente nel sistema AR (Al-Somali, 2023). La versatilità dell'approccio immersivo emerge chiaramente quando si considerano scenari multi-temporali: un'applicazione può elaborare dataset storici per ricostruire l'evoluzione urbana nel corso dei decenni proiettandola sul territorio attuale, oppure simulare cambiamenti futuri sulla base di modelli predittivi AI+GIS sviluppati nella Streambox AR. In questo modo lo studente può letteralmente “camminare” attraverso epoche diverse della città o del paesaggio naturale studiato. Queste esperienze rafforzano la capacità analitica andando oltre la semplice memorizzazione dei dati cronologici; un esempio concreto sono contenuti didattici di Geografia riguardanti le problematiche ambientali, le soluzioni immersive permettono scenari partecipativi: gruppi di studenti possono collaborare in tempo reale

⁴⁵ In ambito di didattica multimediale, il principio del *pre-training* (Mayer, 2009) suggerisce che l'apprendimento è più efficace quando gli studenti acquisiscono familiarità con i concetti chiave o le caratteristiche del sistema *prima* di affrontare il compito complesso. Nel caso specifico delle geotecnologie, un addestramento preliminare su piattaforme desktop accessibili (come *Google Earth* o GIS semplificati) funge da *scaffolding* cognitivo: permette al discente di costruire schemi mentali di orientamento e lettura cartografica in un ambiente a bassa immersività. Questo passaggio riduce il cosiddetto *extraneous cognitive load* (carico cognitivo estraneo) durante la successiva esperienza in AR/VR, evitando che lo sforzo mentale necessario per comprendere l'interfaccia o decodificare la simbologia spaziale sottragga risorse all'apprendimento dei contenuti geografici target.

su mappe comuni aumentate, discutendo interventi urbanistici sostenibili o piani d'emergenza per disastri naturali. L'interfaccia condivisa facilita discussioni basate su oggetti concreti visibili simultaneamente a tutti i partecipanti senza necessità di mediazione verbale continua. Questo tipo di collaborazione visiva può essere sfruttato anche per attività interdisciplinari dove la geografia dialoga con scienze ambientali e ingegneria civile. Va evidenziato che alcune limitazioni riguardano la disponibilità dei dispositivi: mentre applicazioni AR possono essere implementate su tablet e smartphone già presenti negli istituti scolastici, esperienze VR completamente immersive richiedono hardware dedicato più costoso, il che ne limita l'accesso diffuso. Questi vincoli impongono una pianificazione attenta degli investimenti tecnologici laddove si voglia adottare pienamente il paradigma immersivo in più classi o plessi scolastici. Infine, l'adozione sistematica delle tecnologie immersive nella didattica geografica deve tenere conto delle considerazioni etiche sul trattamento dei dati raccolti durante le attività: molti sistemi avanzati memorizzano percorsi utente e preferenze interattive per migliorare le funzionalità future. È necessario assicurarsi che queste informazioni siano conservate secondo standard sicuri con crittografia appropriata (Garante per la Protezione dei Dati Personali - l'aggiornamento del Vademecum per la scuola del 2023; Rapporto Clusit, 2024). Solo così sarà possibile mantenere la fiducia degli utenti nella tecnologia integrata alle lezioni ed evitare rischi legati alla privacy. In sintesi operativa, le applicazioni immersive per l'insegnamento della geografia offrono un ventaglio ampio di opportunità educative: dall'integrazione UAV-GIS alle simulazioni predittive multi-temporali fino alle collaborazioni interattive locali. Il loro impiego appare tanto più incisivo quanto più viene costruito su basi tecniche solide e supportato da pratiche pedagogiche mirate a sfruttarne appieno le potenzialità descrittive ed esplorative nello spazio reale arricchito digitalmente.

Le tecnologie immersive, pur offrendo potenzialità notevoli nella Didattica della Geografia, si confrontano con una serie di limitazioni strutturali e operative che condizionano la loro applicazione su larga scala. Alcune di queste debolezze derivano da fattori tecnici intrinseci,

altre dalla cornice infrastrutturale e organizzativa in cui tali strumenti vengono implementati. L'analisi critica evidenzia che l'AR, a esempio, soffre di problematiche legate al *tracking* e alla stabilità dei sistemi di riconoscimento visivo nell'ambiente reale; un ritardo persistente nel rilevamento degli oggetti fisici o fenomeni come il blocco temporaneo della camera possono interrompere la continuità dell'esperienza aumentata, riducendo l'efficacia didattica in contesti dove la precisione temporale è essenziale (Arymbekov et al., 2024). La dipendenza da hardware relativamente sofisticato costituisce un ulteriore ostacolo: sebbene molte applicazioni AR possano funzionare su smartphone o tablet, le funzioni più avanzate richiedono telecamere RGB-D, sensori ambientali multipli o visori ottici dedicati che non sono disponibili universalmente negli ambienti scolastici. Nel contesto VR, il problema si amplifica per via della necessità di sistemi grafici dedicati e periferiche ad alte prestazioni per garantire fluidità ed evitare disagi visivi e fisici agli utenti (Yi et al., 2024). La qualità del tracciamento spaziale e della resa immersiva è direttamente proporzionale alle capacità dell'hardware; questo comporta inevitabili disparità fra istituzioni dotate di risorse tecnologiche avanzate e quelle con dotazioni minime. La complessità operativa emerge anche nella gestione dei flussi informativi multi-sorgente: l'integrazione tra GIS, dataset UAV e modelli tridimensionali richiede algoritmi capaci di sincronizzare correttamente i dati spaziali in tempo reale, ma le limitazioni computazionali dei sistemi portatili possono impedire simulazioni complesse o visualizzazioni ad alta densità di dettagli (Nex, Remondino, 2014). Nei casi in cui siano integrati modelli predittivi basati su IA occorre considerare tempi di elaborazione che possono allungarsi notevolmente se il sistema non dispone di unità di calcolo dedicate o soluzioni cloud ottimizzate.

Dal lato esperienziale, sia VR sia AR condividono difficoltà legate alla gestione dell'immersione prolungata; sessioni estese possono generare affaticamento visivo, disorientamento spaziale o perdita della concentrazione; fenomeni accentuati nei soggetti non abituati alle tecnologie immersive (Yi et al., 2024). Tali effetti pongono limiti pratici all'uso continuativo durante lezioni curriculari complete. Aspetto delicato nel campo educativo è la curva di

apprendimento delle interfacce immersive: studenti e docenti privi di competenze ICT⁴⁶ (Chang, Wu, 2018) avanzate possono incontrare ostacoli iniziali nell'interazione con elementi aumentati o controlli virtuali (Nye, 2015). In assenza di azioni formative preventive queste difficoltà si traducono in un calo dell'efficacia didattica anche quando il contenuto progettato è valido dal punto di vista pedagogico. Va osservato che le interfacce hanno un peso decisivo sull'usabilità: informazioni sovrapposte a sfondi variabili rischiano di diventare poco leggibili se non vengono adottati criteri grafici rigorosi per contrasto cromatico e dimensione dei caratteri. Il rischio è quello di generare sovraccarico cognitivo nelle sessioni complesse dove la quantità d'informazione presentata simultaneamente supera la soglia gestibile dai fruitori. Limitazioni significative derivano anche da parametri esterni ai sistemi stessi ma imprescindibili nella loro fruizione: normative sulla privacy impongono vincoli rigorosi nella raccolta e nell'elaborazione dei dati personali generati dalle interazioni immersive (Arymbekov et al., 2024). A livello infrastrutturale-organizzativo resistono sfide legate alla formazione del personale docente: integrare efficacemente AR/VR nella prassi didattica richiede figure capaci non solo di far funzionare gli apparati ma anche di progettare esperienze coerenti con metodologie pedagogiche appropriate (Soelistiono, Wahidin, 2023). La mancanza di queste competenze rallenta la piena valorizzazione degli strumenti immersivi anche dove sono disponibili risorse tecnologiche adeguate. Alcuni aspetti riguardano la scalabilità stessa delle soluzioni immersive; l'incremento del numero di utenti che lavorano in contemporanea può mettere a dura prova i sistemi VR multiutente o le piattaforme AR collaborative, provocando cali prestazionali dovuti alla maggiore richiesta computazionale e alla sincronizzazione complessa tra client multipli (Timokhin, Mikhaylyuk, 2023). Nelle

⁴⁶ L'acronimo ICT (*Information and Communications Technology*, in italiano TIC - Tecnologie dell'Informazione e della Comunicazione) estende il concetto tradizionale di *Information Technology* (IT) ponendo l'accento sulla componente comunicativa e sulla convergenza tecnologica. Esso comprende l'insieme integrato di infrastrutture, dispositivi *hardware*, applicativi *software* e reti telematiche necessari per l'elaborazione, la memorizzazione e la trasmissione dei dati. Nel contesto educativo, le ICT non rappresentano meri supporti tecnici, ma costituiscono l'ecosistema abilitante che permette l'accesso alle risorse della conoscenza, la gestione dei processi di apprendimento mediato e lo sviluppo delle competenze digitali (Cfr. *DigComp*).

esperienze collaborative real-time diventa difficile mantenere coerenza perfetta fra le viste individuali quando l'infrastruttura software non è pensata per scenari ad alta intensità partecipativa. Queste limitazioni mettono in evidenza quanto sia essenziale disporre di una strategia integrata che bilanci innovazione tecnologica e sostenibilità operativa: soluzioni come l'adozione modulare delle componentistiche, possono mitigare parte delle criticità consentendo upgrade mirati senza rivoluzioni complete del sistema. Resta tuttavia evidente che l'affidabilità complessiva delle applicazioni immersive dipenda dalla capacità simultanea di affrontare problemi *hardware-software*, vincoli normativi, disponibilità formativa ed equilibrio cognitivo dell'esperienza proposta all'utente finale. Di seguito una matrice tassonomica integrata delle principali geotecnologie utilizzate per la Didattica della Geografia analizzate.

Tabella 4. Matrice tassonomica integrata delle Geotecnologie per la Didattica della Geografia. Elaborazione dell'autore⁴⁷.

Macrocategoria Tecnologica	Strumenti Rappresentativi (Open & Proprietari)	Funzionalità Tecniche Principali	Applicazioni Didattiche e Obiettivi di Apprendimento	Riferimenti Teorico-Metodologici
GIS Desktop, WebGIS (Geographic Information Systems)	QGIS , ArcGIS Pro, ArcGIS Online, gvSIG.	Gestione, manipolazione, analisi e visualizzazione di dati geospaziali; <i>Overlay</i> topologico; Query spaziali; Geoprocessing.	Sviluppo del pensiero computazionale applicato allo spazio; Analisi multicriteri per il <i>decision making</i> territoriale; Comprensione delle relazioni spaziali complesse.	Spatial Thinking (NRC, 2006); PBL (Project-Based Learning); Costruttivismo (costruzione attiva della conoscenza spaziale).
Telerilevamento (Remote Sensing) Earth Observation	EO Browser (Sentinel Hub) , Google Earth Engine, Landsat Explorer, ESA Copernicus.	Analisi spettrale delle immagini satellitari; Monitoraggio temporale (Time-lapse); Calcolo indici vegetazionali	Analisi diacronica del paesaggio (cambiamento nel tempo); Studio dei cambiamenti climatici e dell'uso del suolo (<i>Land Use/Land Cover</i>); Osservazione multiscale.	Environmental Cognition ; Apprendimento basato sull'indagine (<i>Inquiry-Based Learning</i>); Visualizzazione scientifica.

⁴⁷ La tabella propone una classificazione olistica che spazia dagli strumenti tecnico-scientifici (GIS, Earth Observation) alle tecnologie *consumer-grade* e di *Ubiquitous Computing* (LBS, Geo-Social Media). Per ogni macrocategoria sono esplicitate le *affordances* tecnologiche, le ricadute pedagogiche sui processi di *Spatial Thinking* e i paradigmi epistemologici di riferimento (dal Costruttivismo alla *Critical Cartography*), evidenziando il continuum tra l'analisi spaziale esperta e le pratiche neogeografiche quotidiane.

		(NDVI) e climatici.		
Neo-geografia, VGI, Web Mapping	OpenStreet-Map (OSM), Google My Maps, uMap, Ushahidi.	Cartografia collaborativa; Editing cartografico semplificato; <i>Crowdsourcing</i> di dati geografici; Mash-up di dati.	Educazione alla cittadinanza attiva (<i>Active Citizenship</i>); Mappatura di comunità; Analisi critica delle fonti dati; Comprensione della natura sociale della carta.	Critical Cartography; VGI (Volunteered Geographic Information - Goodchild, 2007); Citizen Science.
Geo-Narrazione, Digital Storytelling	ArcGIS StoryMaps, Knight Lab StoryMapJS, Google Earth Projects.	Integrazione multimediale (testo, video, foto) con mappe interattive; Strutturazione sequenziale o non lineare dell'informazione spaziale.	Sviluppo delle competenze transmediali; Narrazione del territorio; Sintesi geografica; Comunicazione efficace di fenomeni complessi.	Geo-media Literacy; Approccio narrativo alla geografia; Geografia emozionale e percettiva.
Tecnologie Immersive (XR: VR/AR)	Visori VR, AR Sandbox, Google Lens, CoSpaces Edu, Merge Cube.	Realtà Virtuale (simulazione immersiva); Realtà Aumentata (sovrapposizione digitale sul reale); Modellazione 3D.	Simulazione del lavoro sul campo (<i>Virtual Fieldwork</i>); Comprensione della morfologia (es. curve di livello tramite AR Sandbox); "Viaggio" in luoghi inaccessibili.	Embodied Cognition (apprendimento attraverso l'esperienza corporea/sensoriale); Apprendimento esperienziale.
Mobile GIS, Data Collection (LBS)	Survey123, Epicollect5, ODK Collect, Geocaching apps.	Geolocalizzazione GNSS; Raccolta dati strutturata sul campo (<i>Ground Truthing</i>); Associazione di metadati multimediali a coordinate.	Validazione sul campo (<i>Fieldwork</i>); Osservazione diretta strutturata; Correlazione tra spazio fisico e rappresentazione digitale; M-Learning (Mobile Learning).	Situated Learning (Lave, Wenger); Metodologia della ricerca-azione; Geografia "fuori dall'aula".
Geovisualizzazione Statistica e Dinamica	Gapminder, Flourish, World Bank Data Visualizer, Carto.	Rappresentazione dinamica di <i>Time-Series</i> ; Cartogrammi (Anamorfosi); Dashboard interattive.	Comprensione delle disuguaglianze globali; Analisi demografica ed economica; Decostruzione degli stereotipi attraverso i dati (approccio <i>Factfulness</i>).	Data Literacy; Visual Sociology; Geografia quantitativa critica.
Categoria "Consumer"	Applicazioni e Piattaforme (Esempi)	Funzione d'uso quotidiano (L'uso "profano")	Analisi Critica e Potenziale Didattico (L'uso "scientifico")	Concetti Chiave, Problematiche Epistemologiche
Piattaforme di Navigazione, Wayfinding	Google Maps, Waze, Apple Maps, Citymapper.	Calcolo del percorso più veloce; Ricerca di POI (Points of Interest); Visualizzazione traffico.	Analisi critica degli algoritmi di routing (perché mi fa passare di qui?); Confronto tra spazio euclideo e spazio-tempo (isocrone); Studio delle gerarchie	Wayfinding passivo vs attivo; "Turn-by-turn navigation" e atrofia delle capacità di orientamento; Bias algoritmico territoriale.

			urbane imposte dalle piattaforme.	
Geo-Social Media, Location-Based Social Networks (LBSN)	Instagram (Geo-tags), Twitter/X, TikTok, Snapchat Map.	Condivisione della posizione; Ricerca di luoghi “instagrammabili”; Check-in virtuali.	Analisi della percezione dei luoghi (<i>Sense of Place</i> digitale); Studio dei flussi turistici e della gentrificazione digitale; Geografie emozionali e reputazione dei territori.	Digital Placemaking; Performatività dello spazio; Geografia della visibilità (quali luoghi sono mappati e quali ignorati?).
Tracker di Attività, Wearable Devices	Strava , Garmin Connect, Nike Run Club, Komoot.	Monitoraggio performance sportiva; Tracciamento percorsi GPS; Condivisione “heatmap”.	Analisi delle pratiche di mobilità umana; Studio della fruibilità degli spazi urbani/verdi; Mappatura dei percorsi più frequentati (Big Data comportamentali).	Quantified Self (automonitoraggio); Sorveglianza digitale (<i>Geoprivacy</i>); Segregazione spaziale basata sull’uso ricreativo.
Realtà Aumentata Ludica (LBG – Location Based Games)	Pokémon GO , Ingress, Pikmin Bloom, Geocaching.	Gioco pervasivo; Esplorazione urbana per obiettivi ludici; Interazione con oggetti virtuali in spazi reali.	Risignificazione dello spazio pubblico; Scoperta di microstorie locali (es. tramite i Pokéstop); Attivazione corporea nello spazio geografico; Studio dei confini pubblico/privato.	Hybrid Space (spazio ibrido fisico/digitale); Gamification territoriale; Riscrittura delle norme spaziali.
Dashboard di Monitoraggio “Real-Time”	FlightRadar24 , MarineTraffic, Windy, Siti meteo consumer.	Controllo orari voli/treni; Previsioni del tempo; Curiosità sui flussi.	Visualizzazione delle interconnessioni globali (globalizzazione tangibile); Comprensione dei flussi (aerei, navali, atmosferici); Lettura di scale geografiche diverse in tempo reale.	Dynamic Geography; Interdipendenza spaziale; Visualizzazione di sistemi complessi non visibili a occhio nudo.
Immagini Sferiche, Street View	Google Street View , Mapillary.	Vedere “com’è fatto” un posto prima di andarci; Navigazione virtuale a livello stradale.	Osservazione virtuale del paesaggio urbano (degrado, architettura, vegetazione); Confronto temporale (funzione “time travel” di Street View); Analisi della sicurezza percepita.	Visual Geography; Simulazione dell’esperienza <i>in situ</i> ; Limiti della rappresentazione fotografica (cosa è escluso dall’inquadratura?).

4.2 *Design thinking* e progettazione centrata sull'utente (UCD): il modello metodologico

Il design thinking, applicato allo sviluppo di una Sandbox AR educativa, si configura come un processo iterativo che integra competenze interdisciplinari per trasformare bisogni e aspettative degli utenti in soluzioni tecnologiche efficaci. La centralità dell'utente nel processo è un principio cardine: la progettazione viene orientata da un'esplicita comprensione delle caratteristiche personali, dei compiti da svolgere e degli ambienti operativi di utilizzo, con il coinvolgimento degli utilizzatori lungo tutte le fasi. Questa centralità non è statica, ma va costantemente nutrita attraverso osservazioni, interviste e sperimentazioni dirette, così da far emergere esigenze esplicite ma anche implicite, spesso rivelate solo in contesti reali. In queste tipologie d'intervento, è risultato fondamentale il lavoro all'interno dei contesti scolastici: l'attività di docenza alla scuola secondaria, in concomitanza con l'attività di ricerca dottorale, ha permesso non soltanto di inserire i prototipi via via elaborati in contesti d'utilizzo reali – permettendone l'utilizzo e la raccolta dati –, ma soprattutto osservare e registrare la risposta dell'utenza rispetto agli strumenti e ai mediatori utilizzati. Nell'applicazione delle tecnologie immersive nella Didattica della Geografia, il *design thinking* rileva che l'esperienza dell'utente non deriva esclusivamente dall'interfaccia o dalle funzionalità implementate, ma anche dalla percezione complessiva della coerenza tra strumento e obiettivo formativo. Il bilanciamento tra valore estetico e utilità funzionale assume importanza strategica: elementi visuali devono supportare la comprensione dei dati territoriali o scientifici senza ostacolare la visibilità del contesto fisico. La scelta di rappresentazioni tridimensionali in ambienti VR/AR deve tenere conto dell'ergonomia visiva per evitare affaticamento o disorientamento (Christmann et al., 2022).

Un approccio strutturato al *design thinking* prevede fasi iterative di ideazione, prototipazione e verifica: si parte dalla raccolta dati qualitativa e quantitativa sui futuri fruitori, studenti e docenti, per definire una «mappa dei bisogni», che diventa riferimento costante nelle

successive scelte progettuali (Castoldi et al. 2025; Rossi, 2022). In questa mappa rientrano sia aspetti cognitivi (conoscenze pregresse, modalità di apprendimento preferite) sia condizioni operative (infrastruttura tecnica disponibile, vincoli organizzativi). Una volta identificati gli obiettivi prioritari si passa alla generazione di idee tramite *workshop* o attività di co-design (Figura 5).

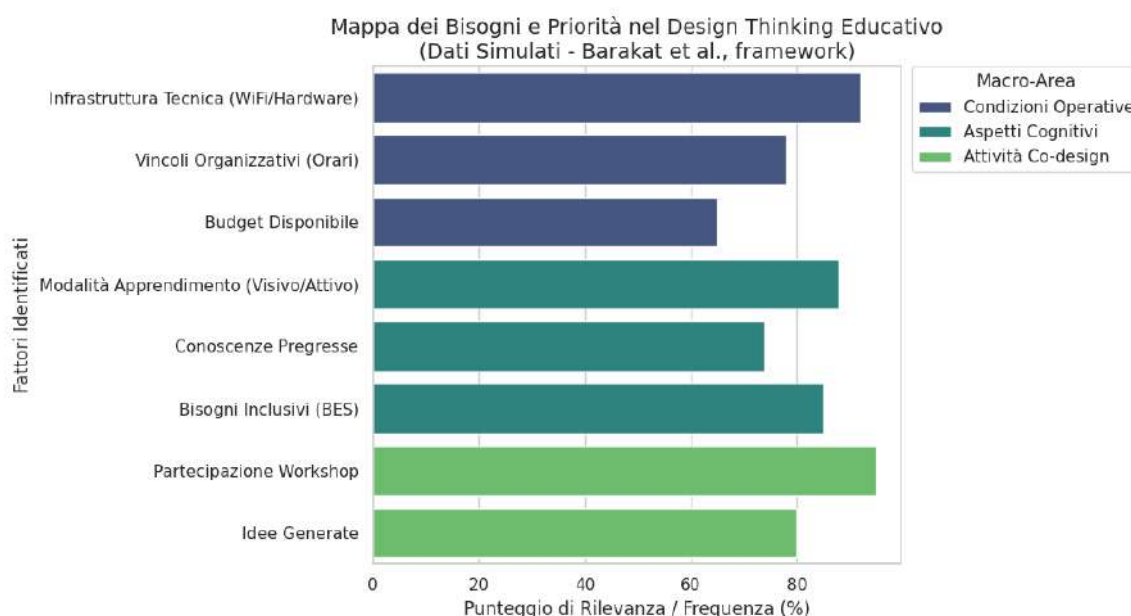


Figura 5. Prioritizzazione dei fattori nella “Mappa dei Bisogni” per il Design Thinking educativo. Elaborazione dell’autore su dati in Appendice – Tabella 1⁴⁸.

In questo senso, il prototipo non è pensato come versione preliminare destinata ad essere rapidamente abbandonata: diventa, d’altra parte, il mezzo attraverso cui verificare ipotesi progettuali e raccogliere *feedback* immediati dagli utenti reali. Nei contesti educativi immersivi questo significa costruire ambienti virtuali semplificati, ma rappresentativi delle funzionalità chiave della Sandbox AR, testandoli direttamente in aula o laboratorio e misurando

⁴⁸ Il grafico a barre orizzontali illustra la gerarchia di rilevanza (punteggio 0-100) assegnata agli elementi emersi durante la fase di ricerca. I fattori sono raggruppati per Macro-Area (Condizioni Operative, Aspetti Cognitivi, Attività di Co-design), evidenziando come la partecipazione ai workshop e l’infrastruttura tecnica costituiscano le variabili critiche primarie.

parametri operativi come tempi di apprendimento delle interazioni o facilità di comprensione dei *layers* informativi. I dati raccolti alimentano cicli successivi nel processo di *design thinking* in cui si elaborano modifiche mirate prima dello sviluppo avanzato. La dimensione partecipativa rimane una costante nelle varianti più efficaci del *design thinking* applicato all'UCD educativo: coinvolgere direttamente gli *stakeholders*, nel caso scolastico studenti, docenti e tecnici, durante le sessioni creative aumenta la probabilità che la soluzione finale risponda realmente alle esigenze dichiarate. Anche nei casi in cui i partecipanti non possiedono competenze tecniche approfondite nella modellazione XR, strumenti semplificati possono permettere loro di contribuire concretamente oltre la fase meramente ideativa (Alex, Hily, 2024).

Il coinvolgimento diretto degli utenti nella progettazione di una Sandbox AR che abbia finalità didattica ed educativa rappresenta un fattore determinante per ottenere un sistema che rifletta realmente il contesto d'uso e le aspettative dei fruitori finali. L'approccio partecipativo consente di raccogliere contributi concreti già nelle fasi iniziali, traducendo osservazioni e preferenze in scelte progettuali misurabili. Nei contesti educativi, ciò implica integrare nei processi progettuali studenti e docenti non come semplici destinatari ma come co-sviluppatori di contenuti, funzionalità e interfacce: la transizione da un modello *top-down* a uno co-creativo si fonda sulla costruzione di spazi condivisi – fisici o virtuali – dove testare soluzioni parziali e stimolare discussione critica sull'utilizzo previsto dello strumento (Vauchez et al., 2023) che dovrà configurarsi come mediatore didattico geografico. Queste sessioni aperte portano alla definizione di scenari d'uso più realistici rispetto a quelli ipotizzati da chi progetta tali strumenti lato ricerca. Un metodo efficace per strutturare tale coinvolgimento è la creazione di prototipi funzionali operanti in ambienti controllati, in cui parametri d'utilizzo, gestione dei colori, scelta dei media da manipolare, applicazioni da implementare, siano modificabili per testare la risposta dell'utente in condizioni variabili (Lei et al., 2023). Simulazioni in laboratorio artificiale permettono di escludere fattori esterni non pertinenti e concentrarsi sull'analisi della percezione e dell'interazione con l'interfaccia o i modelli

tridimensionali aumentati. Questi esperimenti diventano terreno fertile per raccogliere dati dettagliati sui comportamenti degli utenti, che a loro volta vengono integrati nella fase successiva del ciclo progettuale⁴⁹.

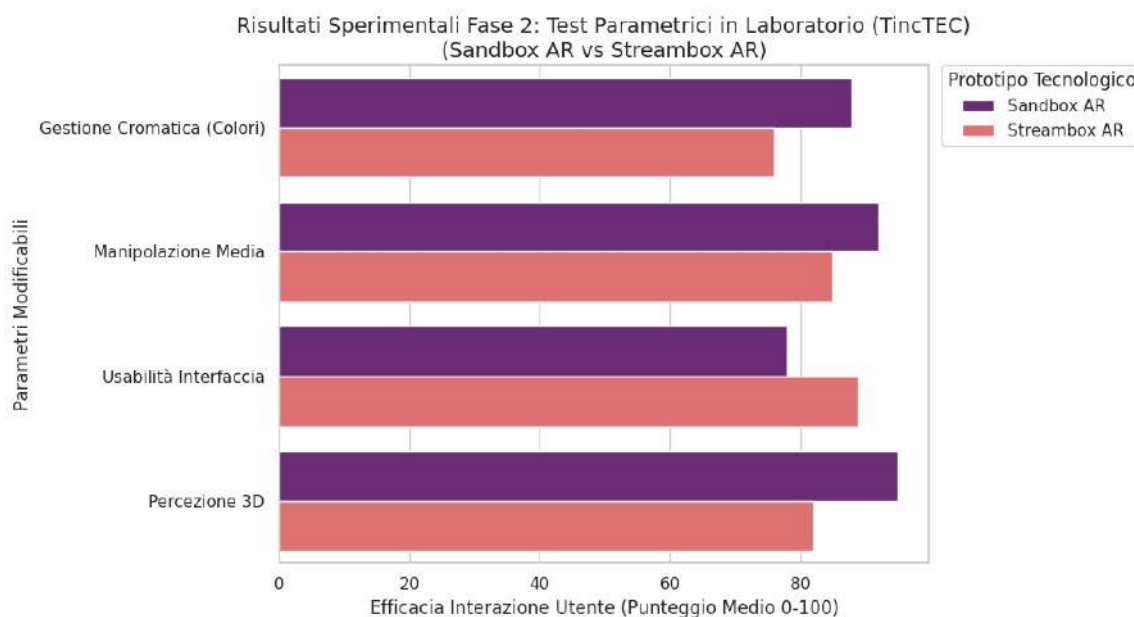


Figura 6. Analisi comparativa dell'interazione utente su prototipi funzionali in ambiente controllato. Elaborazione dell'autore su dati in Appendice – Tabella 2⁵⁰.

Secondo Wang e Li, il contributo empirico derivante dall'osservazione diretta costituisce un fondamento indispensabile per identificare bisogni latenti e problematiche di usabilità non rilevabili con analisi teoriche (Wang, Li, 2025). In questo senso, l'adozione di metodologie come *A/B testing* su differenti versioni dell'interfaccia consente di valutare quale soluzione favorisca tempi di completamento più brevi o minore carico cognitivo. Nella Sandbox AR

⁴⁹ Il ciclo di raccolta dati ha visto due fasi principali: una prettamente condotta a scuola, i cui utenti sono studenti delle scuole secondarie di primo e secondo grado, assieme a docenti coinvolti nella sperimentazione e nell'utilizzo delle tecnologie; una prettamente laboratoriale in ambiente accademico, condotta all'interno del laboratorio di ricerca TincTEC dell'Università di Macerata, luogo in cui sono stati realizzati e sviluppati anche tutti i prodotti di ricerca tecnologici – Sandbox AR, Streambox AR e loro upgrade – oggetto di questa tesi.

⁵⁰ Il grafico illustra i risultati dei test condotti presso il laboratorio TincTEC (Università di Macerata), focalizzati sulla risposta degli utenti a parametri variabili quali la gestione cromatica e la manipolazione dei media. I dati evidenziano le differenze prestazionali tra i sistemi Sandbox AR e Streambox AR, permettendo di isolare i fattori di usabilità critici prima della validazione su larga scala a scuola.

queste prove possono implicare la variazione del *layout* informativo sovrapposto alla scena reale o la modifica dei sistemi di interazione (*gesture*, controller fisici, media da manipolare). La partecipazione attiva dell'utente diventa anche strumento di valorizzazione creativa: utenti occasionalmente privi di competenze tecniche avanzate possono proporre idee visive o concettuali che arricchiscono il progetto con prospettive nuove. Questo consente allo sviluppatore di valutare la comprensibilità delle strutture geografiche visualizzate riducendo errori interpretativi in scenari più complessi. Lo stato dell'arte rileva che processi educativi che integrano sessioni operative su VR/AR aumentano competenze didattiche e tecnologiche tanto negli studenti quanto nei docenti (Oberdörfer et al., 2021). Il coinvolgimento nel processo creativo diventa una esperienza formativa in sé: durante *workshop* tematici gli utenti apprendono nozioni essenziali di informatica e tecnologie, *design guidelines* e principi ergonomici, acquisendo capacità utili non solo all'esperienza specifica ma trasferibili ad altri ambiti didattici e laboratoriali che, dovutamente scalati nei contesti della scuola secondaria, arricchiscono ancora di più i processi di formazione; questa doppia valenza – partecipativa e formativa – rafforza l'efficacia complessiva del progetto.

Va considerato anche il contributo delle attività post-test: interviste semi-strutturate condotte dopo sessioni immersive raccolgono informazioni sull'impressione iniziale rispetto all'interfaccia utente, sulle scelte compiute durante la personalizzazione del software o sull'usabilità percepita dei sistemi (Langener et al., 2022). Tali *feedback* aiutano ad affinare elementi funzionali ed estetici, dalla disposizione dei comandi all'introduzione di punti di riferimento visivi nell'ambiente aumentato per migliorare l'orientamento spaziale. Per facilitare il flusso costante tra dati utente e sviluppo tecnologico sono state predisposte piattaforme modulari che integrino meccanismi automatici di raccolta dati durante le sessioni d'uso (Timokhin, Mikhaylyuk, 2023). Queste infrastrutture multi-agente consentono ai non esperti di eseguire autonomamente analisi mirate grazie a interfacce grafiche *web user-friendly*, rafforzando il principio dell'autonomia partecipativa (Figura 7).

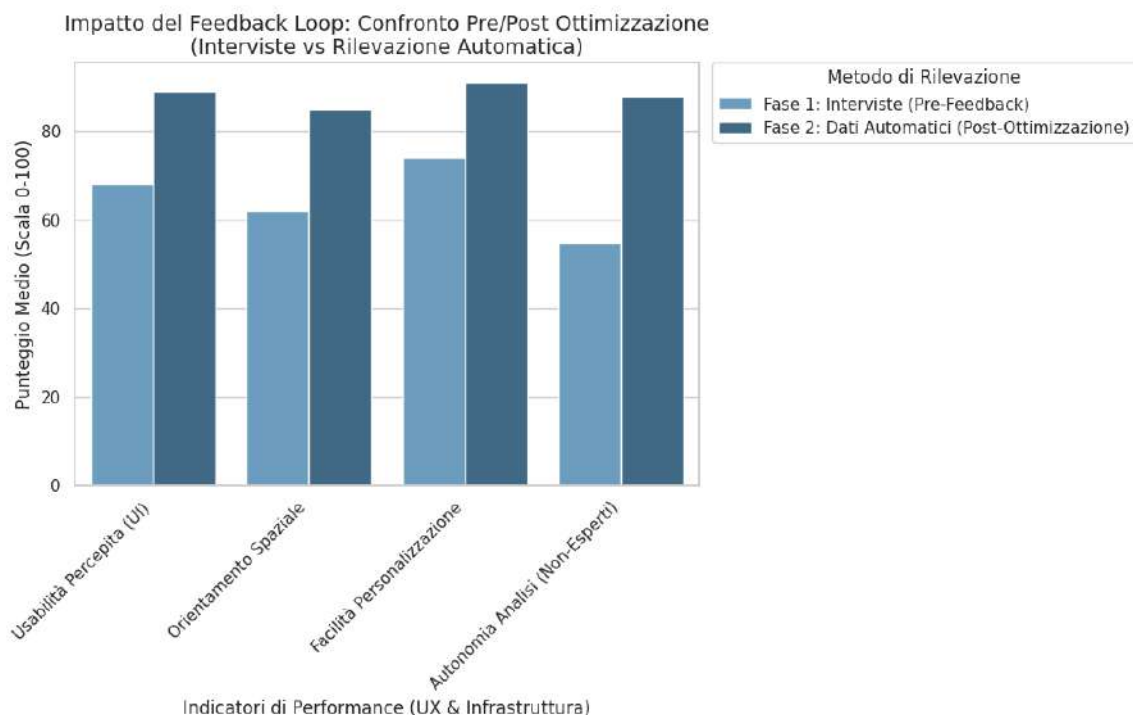


Figura 7. Efficacia del ciclo iterativo di ottimizzazione basato su feedback qualitativi e quantitativi. Elaborazione dell'autore su dati in Appendice – Tabella 3⁵¹.

Attraverso *dashboard* dinamiche i docenti (Figura 8) possono monitorare prestazioni individuali e adattare attività formative senza necessità di intervento diretto dello sviluppatore. La metodologia da cui deriva tale impostazione, richiama lo stato dell'arte rispetto all'utilizzo delle tecnologie immersive in contesti museali o non formali d'apprendimento: le esperienze documentate in questi ambiti applicativi, cognitivamente *friendly*, indicano come il coinvolgimento anticipato degli utenti nei processi progettuali possa generare schemi concettuali maggiormente rispondenti alle esigenze percettive (Yi et al., 2024).

⁵¹ Il grafico evidenzia l'incremento delle performance percepite e misurate tra la fase iniziale di interviste semi-strutturate e la fase successiva di utilizzo delle piattaforme modulari automatiche. L'incremento marcato nella voce "Autonomia Analisi" dimostra il successo dell'approccio partecipativo supportato da interfacce web user-friendly.



Figura 8. Interfaccia della Dashboard Dinamica per il Docente⁵². Creazione dell'autore su metriche in Appendice D1.

Trasferire questo paradigma alla costruzione di una Sandbox AR proprietaria del gruppo di ricerca in Geografia dell'Università di Macerata, significa pensare non solo alle funzioni tecniche ma anche alla coerenza narrativa dell'esperienza immersiva (lo storytelling geografico o il *placetelling*⁵³ (Rocca, Gasparini, 2022; Pollice, 2022), adattandola al linguaggio

⁵² La visualizzazione integra strumenti di monitoraggio in tempo reale (heatmap a sinistra e radar chart a destra) con un pannello di controllo "no-code" (in basso). Questo design permette all'insegnante di identificare immediatamente gli studenti in difficoltà (es. "M. Rossi" evidenziato in rosso) e di adattare l'attività didattica modificando le variabili ambientali della Sandbox (pioggia, pendenza) senza richiedere supporto tecnico, in linea con i principi di usabilità museale.

⁵³ Il termine *Placetelling*, neologismo derivante dalla crasi tra *place* e *storytelling*, definisce una metodologia di narrazione territoriale volta a restituire l'identità profonda e il *Genius Loci* di uno spazio, superando la tradizionale descrizione topografica o turistico-informativa. Tale pratica trova il suo fondamento teorico nella geografia umanistica e nella distinzione concettuale tra *spazio* (inteso come estensione geometrica astratta)

visivo degli utenti *target*. L'aspetto collaborativo all'interno dello stesso ambiente educativo è un ulteriore elemento qualificante: protocolli AR multiutente permettono a gruppi eterogenei di intervenire simultaneamente sui parametri della simulazione mantenendo sincronizzazione visiva fra dispositivi diversi (Nye, 2015). Il dialogo continuo tra team tecnico e comunità utente richiede tuttavia strumenti adeguati alla gestione del consenso informato qualora vengano raccolti dati personali durante le fasi progettuali o di test (Arymbekov et al., 2024). Garantire trasparenza nelle procedure aumenta la fiducia nel progetto e rafforza la disposizione alla partecipazione continuativa. In molti casi questo aspetto etico diventa discriminante nella possibilità stessa di implementare tecnologie immersive in ambito scolastico. Il risultato di un coinvolgimento strategico è dunque una piattaforma educativa che incorpora i contributi concreti degli utilizzatori in ogni fase – dall'ideazione alla verifica sul campo – assicurando così maggiore aderenza agli obiettivi didattici reali, miglior usabilità percepita e un ricco bagaglio esperienziale condiviso tra sviluppatori e comunità scolastica.

Un altro elemento metodologico cruciale è porre l'accento sul *testing user-centered* continuo: secondo le linee guida ISO 9241-210 incorporate nei processi UCD⁵⁴ (*International Organization for Standardization*, 2019), il progetto deve essere guidato e perfezionato tramite valutazioni ripetute con utenti reali durante lo sviluppo. Questo approccio riduce il rischio che soluzioni esteticamente attraenti risultino inefficaci dal punto di vista pedagogico. Nei sistemi immersivi VR/AR per la Didattica della Geografia ciò comporta monitorare sia

e *luogo* (lo spazio investito di significati umani, esperienze e memorie); attraverso la narrazione, il territorio viene risemantizzato, trasformando elementi fisici e paesaggistici in "testi" culturali capaci di generare un legame empatico con il fruitore. Operativamente, il placetelling si avvale spesso di strategie transmediali per valorizzare il patrimonio immateriale e le memorie della comunità locale, favorendo dinamiche di turismo esperienziale in cui il visitatore non è semplice osservatore ma parte attiva del racconto.

⁵⁴ Con l'acronimo UCD (*User-Centered Design*, o più propriamente *Human-Centred Design* nella terminologia tecnica) si fa riferimento all'approccio progettuale iterativo codificato dalla norma internazionale ISO 9241-210, la quale stabilisce che la progettazione di sistemi interattivi debba essere guidata da una comprensione esplicita degli utenti, dei loro compiti e degli ambienti in cui operano. Secondo tale standard, il processo non è lineare ma ciclico e si fonda su una valutazione costante delle soluzioni di design: il testing continuo con gli utenti non rappresenta dunque una fase meramente conclusiva, bensì il motore di affinamento progressivo necessario per garantire che il prodotto finale soddisfi i requisiti di usabilità e di esperienza d'uso (*User Experience*).

metriche quantitative (precisione nel posizionamento di elementi aumentati) sia fattori qualitativi (gradimento percepito dall'utente).

Il processo vede una serie di interazioni sistematiche tra *team* di sviluppo, utenti finali e contesto operativo, con analisi sia qualitative che quantitative per individuare i punti deboli e le opportunità di miglioramento. Questa dinamica non si esaurisce nella semplice raccolta dati, ma implica la capacità di interpretare i comportamenti osservati all'interno dell'ambiente immersivo per dare priorità agli interventi (Wang, Li, 2025). Il ciclo tipico prevede sessioni d'uso pianificate, durante le quali vengono monitorati parametri chiave come qualità dell'interazione, tempi di completamento delle attività aumentate, problemi operativi dell'hardware e chiarezza percepita dei contenuti tridimensionali. La Sandbox AR può includere strumenti integrati per la registrazione automatica delle azioni utente (*data logging*), consentendo una tracciabilità dettagliata senza dipendere esclusivamente da osservazioni esterne (Timokhin, Mikhaylyuk, 2023); la struttura del *feedback* continuo viene rafforzata dalla partecipazione attiva degli stakeholder lungo tutto il ciclo iterativo. Queste sessioni collaborative favoriscono il riscontro di esigenze implicite difficili da rilevare con test standardizzati, come preferenze grafiche specifiche o necessità legate a particolari modalità cognitive.

Sul piano tecnico-operativo, ogni iterazione diventa banco prova per misurare l'efficacia delle integrazioni sviluppate tra le versioni precedenti. Nelle versioni evolute della Sandbox AR come la Streambox AR, le iterazioni comprendono anche test avanzati sulle simulazioni in tempo reale di fenomeni territoriali e sull'integrazione UAV-GIS predisposta per alimentare la visualizzazione immersiva (Nex, Remondino, 2014). Il *feedback* non riguarda quindi soltanto l'esperienza utente diretta ma anche l'affidabilità e coerenza dei dati mostrati rispetto alle fonti originali. In scenari multiutente vengono verificate sincronizzazione spaziale e uniformità grafica fra dispositivi diversi; anomalie come disallineamenti o lag percepibili possono orientare lo sviluppo verso protocolli distribuiti più performanti (Nye,

2015). La gestione delle iterazioni deve tener conto anche della dimensione formativa: il *feedback* raccolto dagli studenti può includere riflessioni sui benefici didattici percepiti o rilevazioni sugli apprendimenti. Gli insegnanti sono spesso in grado di correlare specifiche funzioni introdotte nelle ultime versioni con miglioramenti osservabili nell'apprendimento o nella partecipazione attiva degli alunni. In questo modo gli input raccolti assumono un duplice valore – supportano sia la revisione tecnica sia quella pedagogica – rafforzando il legame tra design tecnologico e obiettivi educativi dichiarati. Un elemento critico è il mantenimento della motivazione partecipativa lungo cicli estesi: piattaforme modulari possono diventare strumenti strategici poiché permettono agli utenti avanzati (docenti o tecnici) di personalizzare rapidamente determinati aspetti visivi o funzionali senza attendere rilasci ufficiali (Timokhin, Mikhaylyuk, 2023). Questo aumento dell'autonomia contribuisce a generare un flusso continuo di micro-iterazioni locali che vengono poi comunicate agli sviluppatori delle tecnologie per un'integrazione definitiva nelle versioni finali della Sandbox AR. Dal punto di vista dei metodi adottati per formalizzare i risultati del feedback, questionari strutturati orientati secondo modelli Kano-AHP (Yi et al., 2024) consentono una classificazione accurata delle richieste in base alla loro importanza percepita dall'utente e alla capacità reale del sistema di soddisfarle entro tempi brevi (Figura 9).

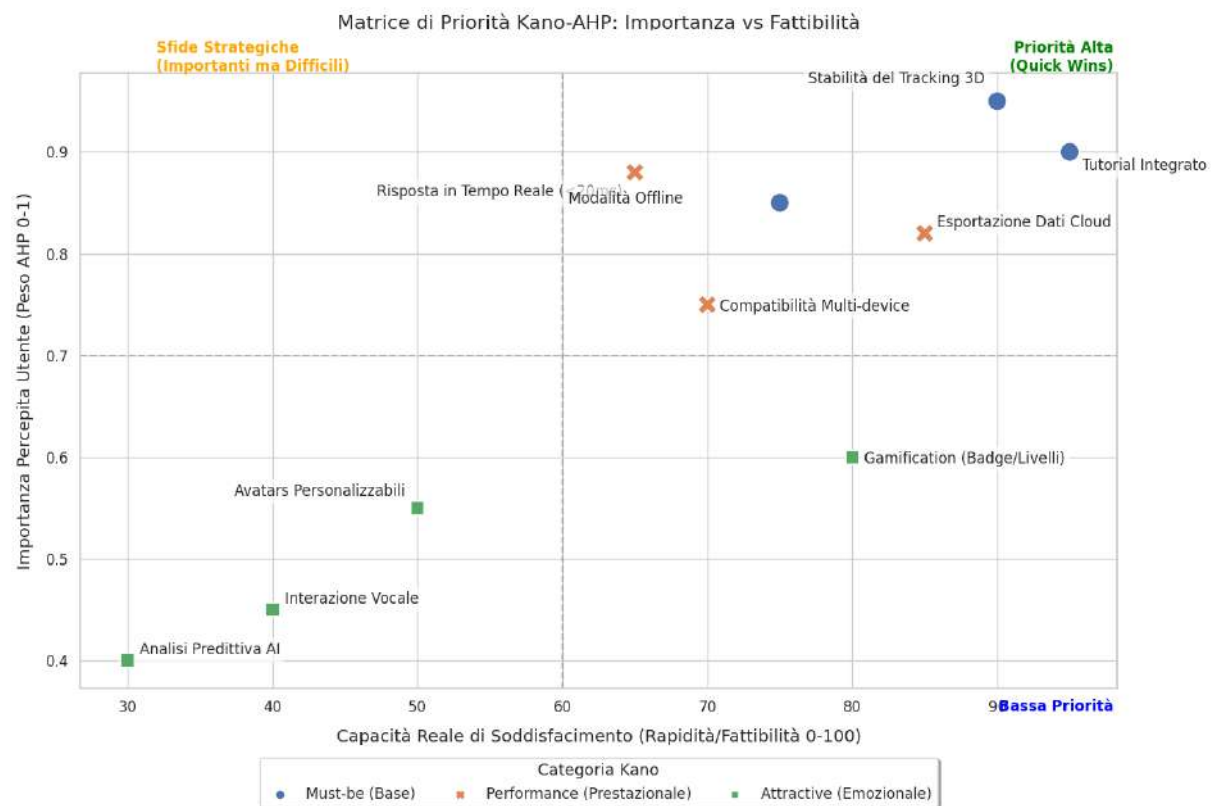


Figura 9. Matrice di prioritizzazione dei requisiti utente. Il diagramma incrocia l'importanza gerarchica (AHP) con la fattibilità tecnica. La legenda, posta in calce, distingue le categorie del modello Kano. Elaborazione dell'autore su dati in Appendice - Tabella 4.

I requisiti giudicati essenziali ricevono priorità alta nelle release successive; quelli valutati come desiderabili ma non imprescindibili vengono pianificati su orizzonti temporali meno immediati, evitando dispersione delle risorse tecniche.

Le osservazioni derivate da tali prove hanno spesso portato a ottimizzazioni hardware-software volte a migliorare robustezza operativa della Sandbox AR sviluppata all'Università di Macerata, indipendentemente dalle variabili esterne previste dal contesto scolastico ideale. La combinazione tra cicli rapidi focalizzati su micro-funzioni e rilanci globali mirati alle architetture fondamentali definisce una strategia sostenibile capace di mantenere viva l'attività di sviluppo dello strumento Sandbox AR lungo tutto il suo ciclo vitale.

Dal punto di vista creativo la metodologia del *design thinking* incoraggia processi volti alla ciclicità e meno alla linearità nello sviluppo: ogni prototipo genera nuove informazioni che alimentano – anche a ritroso – l’ideazione successiva. Questo ciclo può includere variazioni significative nella rappresentazione grafica degli elementi scientifici; studi sull’impatto delle scelte visive nella comprensibilità dei fenomeni suggeriscono modifiche adattive alle modalità di visualizzazione già nella fase pre-prototipo (Christmann et al., 2022). Nell’ambito della Streambox AR, arricchita con successivi i successivi upgrade di Streambox AR, con la cartografia GIS e con sistemi di AI, queste scelte grafiche possono diventare dinamiche grazie a modelli predittivi che variano automaticamente densità informativa o colori per accentuare rilevanze specifiche. La coerenza metodologica deve essere garantita dalla presenza di un *framework* organizzativo condiviso dall’intero team multidisciplinare coinvolto nello sviluppo; questo *framework* (Figura 10) include strumenti per documentare ogni passo del processo creativo con riferimenti incrociati fra obiettivi didattici prefissati e decisioni tecnologiche assunte. Tale tracciabilità consente al gruppo di valutare retrospettivamente cosa ha funzionato o meno nelle iterazioni precedenti rispetto alla mappa iniziale dei bisogni utenti (Castoldi et al., 2025).



Figura 10. Schema del framework organizzativo per la coerenza metodologica nel design educativo. Elaborazione dell'autore⁵⁵

Tabella 5. Estratto del “Registro di Documentazione Incrociata” (Cross-Reference Log). Elaborazione dell'autore⁵⁶.

ID Fase/Iterazione	Obiettivo Didattico Prefissato (Goal)	Riferimento Mappa Bisogni	Decisione Tecnologica Assunta (Tech Decision)	Razionale (Giustificazione Incrociata)	Stato/Valutazione Retrospettiva
ITER-01-A	Migliorare la comprensione spaziale della topografia.	<i>Bisogno Cognitivo: Apprendimento cinestetico/visivo.</i>	Implementazione di Sandbox AR con sabbia modellabile.	La manipolazione fisica diretta (tech) soddisfa il bisogno cinestetico per concretizzare concetti astratti (goal).	Efficace: Feedback positivo dagli studenti nei test preliminari.
ITER-01-B	Favorire l'analisi autonoma dei	<i>Vincolo Operativo: Scarse</i>	Sviluppo di una Dashboard Web con UI	L'interfaccia user-friendly (tech) abbatte la barriera	In Revisione: Richiesta ulteriore

⁵⁵ Il diagramma visualizza il flusso di lavoro iterativo adottato dal team multidisciplinare: partendo dalla “Mappa dei Bisogni” (Input), il processo si articola attraverso un hub di documentazione condivisa che mette in costante relazione gli obiettivi didattici con le scelte tecnologiche. Il ciclo si chiude con la valutazione retrospettiva (*Feedback Loop*), essenziale per validare l'efficacia delle iterazioni rispetto ai requisiti iniziali.

⁵⁶ La matrice esemplifica la struttura utilizzata per garantire la tracciabilità decisionale: ogni riga collega esplicitamente un obiettivo didattico (pedagogia) a una specifica implementazione tecnica (tecnologia), fornendo il *rationale* che giustifica la scelta e lo stato della valutazione retrospettiva. Questo strumento permette di verificare l'allineamento costante con la mappa dei bisogni durante tutte le fasi di sviluppo.

	dati da parte dei docenti.	competenze tecniche pregresse.	semplificata (no-code).	d'ingresso tecnica, abilitando l'autonomia (goal).	semplificazione dei grafici.
ITER-02-C	Aumentare il coinvolgimento emotivo durante le lezioni.	<i>Bisogno Emozionale</i> : Elementi di gamification (Attractive).	Integrazione di un sistema di Badge Digitali per il completamento di task.	L'elemento di ricompensa digitale (tech) mira a sostenere la motivazione intrinseca (goal) come da modello Kano.	Pianificato : In attesa di sviluppo per la prossima release.

La documentazione (il cui estratto è proposto nella Tabella 5) assume valore ulteriore quando viene integrata con risultati provenienti dai test *System Usability Scale* (SUS)⁵⁷ (Brooke, 1996) applicati agli ambienti VR utilizzati in fase prototipale, fornendo una misura sintetica del livello generale di usabilità percepita. L'aspetto culturale del design thinking implica considerare inclusività e accessibilità fin dagli stadi iniziali della progettazione XR. Non tutti gli utenti potenziali possiedono uguale familiarità con le tecnologie immersive o stesse capacità visivo-motorie; prevedere funzioni alternative per chi presenta tali limitazioni amplia la platea raggiungibile dal sistema geo-didattico aumentato (Alex, Hily, 2024). L'inclusione, inoltre, favorisce forme di creatività condivisa: prospettive differenti portano a soluzioni più versatili soprattutto quando l'obiettivo educativo tocca contenuti complessi come quelli della geomorfologia o dei sismi simulati nella Streambox AR. Riassumendo l'aspetto applicativo e metodologico del *design thinking* che ha guidato la progettazione centrata sull'utente (UCD) della Sandbox AR progettata all'interno del Centro di Ricerca TincTEC dell'Università di Macerata, questi si riassumono in una sequenza iterativa composta da ascolto attivo degli *stakeholder* (Castoldi et al., 2025), ideazione collaborativa e

⁵⁷ Il System Usability Scale (SUS) rappresenta uno degli strumenti psicometrici più diffusi e validati a livello internazionale per la valutazione soggettiva dell'usabilità. Ideato originariamente da John Brooke come metodo "rapido ed efficace" (*quick and dirty*), il test si articola in un questionario di dieci item a risposta chiusa su scala Likert a cinque punti (da "fortemente in disaccordo" a "fortemente d'accordo"), il cui risultato confluisce in un punteggio unico normalizzato da 0 a 100. Nonostante sia stato concepito per interfacce grafiche tradizionali, la sua robustezza statistica e la sua indipendenza dalla tecnologia specifica ne hanno legittimato l'adozione estensiva anche nella valutazione di sistemi complessi e ambienti di Realtà Virtuale, permettendo di quantificare la percezione dell'utente in modo sintetico e comparabile.

partecipativa (Vauchez et al., 2023), prototipazione rapida (Alex, Hily, 2024), test UCD ripetuti (Christmann et al., 2022) e revisione creativa continua supportata da strumenti condivisi nel *framework* operativo⁵⁸.

4.3 Analisi dei requisiti didattici e tecnologici: dal Corpus degli apprendimenti geografici complessi all’elaborazione del mediatore in AR

La definizione degli obiettivi didattici in un progetto educativo basato su una Sandbox AR richiede un processo sistematico che traduca le esigenze formative in specifiche funzionalità e contenuti aumentati. Questo passaggio è strettamente collegato alla capacità di interpretare il *curriculum* scolastico e i piani di insegnamento, individuando con precisione le competenze da sviluppare e il livello di approfondimento richiesto per ciascun argomento; gli obiettivi devono essere formulati in modo chiaro, misurabile e realistico, bilanciando il potenziale tecnico della piattaforma con la fruibilità in contesti operativi reali, come emerge dall’immagine che segue (Figura 11).

⁵⁸ La reiterazione delle sessioni di verifica con gli utenti rappresenta un cardine del processo UCD, distinguendo la validazione formativa (volta al miglioramento del prototipo in fieri) da quella sommativa (finale). Come argomentato da Christmann et al. (2022), l’applicazione ciclica dei test di usabilità durante le diverse fasi di sviluppo consente di intercettare precocemente le discrepanze tra il modello concettuale dei progettisti e l’esperienza reale dei fruitori; tale approccio ricorsivo risulta particolarmente critico nella progettazione di ambienti in Realtà Aumentata, dove l’ergonomia cognitiva e l’interazione spaziale richiedono affinamenti progressivi impossibili da determinare a priori in un’unica fase di valutazione.

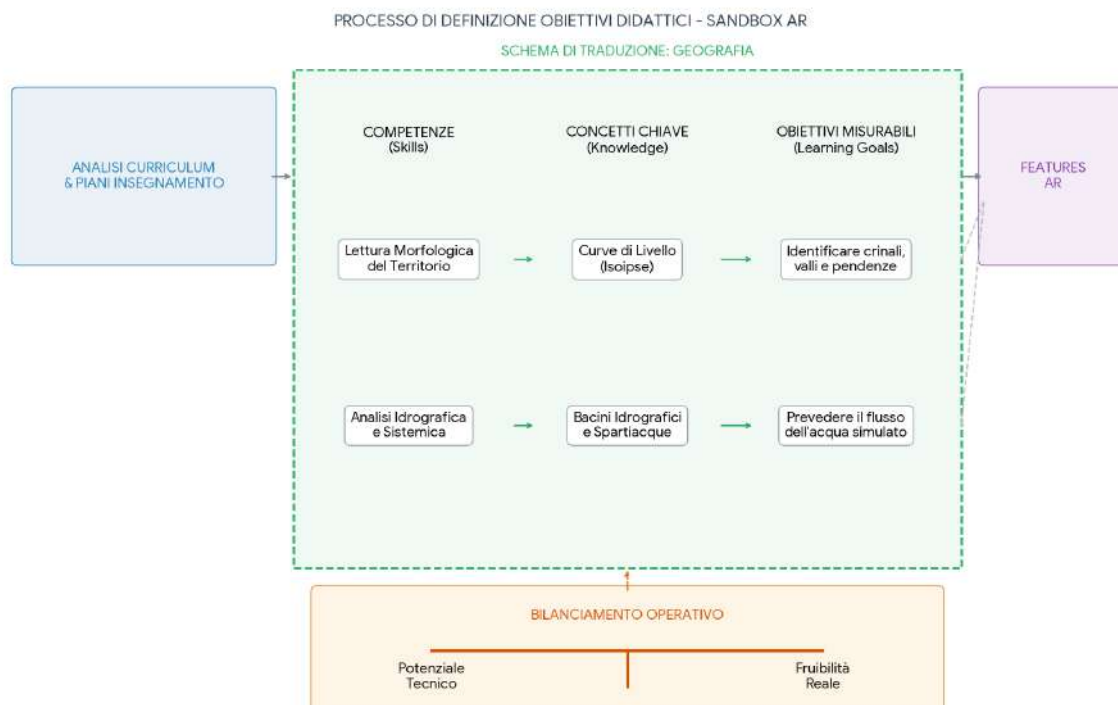


Figura 11. Schema metodologico per la traduzione degli obiettivi didattici in funzionalità AR per la costruzione di geotecnologie. Elaborazione dell'autore⁵⁹.

In tal senso, si parte dall'analisi delle discipline coinvolte e delle conoscenze pregresse degli studenti, così da stabilire traguardi formativi coerenti con il loro grado iniziale di competenza. Un approccio efficace consiste nell'articolare gli obiettivi su più livelli di complessità. Nel caso della Didattica della Geografia, un primo livello può prevedere la comprensione di mappe fisiche arricchite digitalmente, mentre un livello superiore può includere la capacità di manipolare direttamente modelli tridimensionali per simulare variabili ambientali come specifiche geomorfologie o variazioni altimetriche (Nex, Remondino, 2014). Questa progressione supporta l'apprendimento graduale evitando sovraccarichi cognitivi dovuti alla presentazione simultanea di concetti troppo avanzati. La strutturazione multilivello si rivela

⁵⁹ L'infografica illustra il flusso logico di progettazione: partendo dall'analisi dei documenti curricolari, si procede alla scomposizione delle competenze (es. lettura morfologica) in concetti chiave e obiettivi misurabili. Questo processo di traduzione è subordinato a un "bilanciamento operativo" costante tra il potenziale tecnico dello strumento e i vincoli reali di fruibilità in classe.

utile anche per differenziare il percorso formativo in base alle esigenze di gruppi eterogenei. Gli obiettivi didattici vanno inoltre integrati con criteri operativi legati all'usabilità del sistema. Un *target* come “acquisire capacità di interpretare correttamente flussi GIS integrati in AR” implica non solo la comprensione teorica del dato geospaziale, ma anche l'abilità pratica nel gestire interfacce complesse senza errori significativi (Oberdörfer et al., 2021). Questa doppia prospettiva, concettuale e operativa, deve essere esplicitata fin dalla fase progettuale per evitare discrepanze tra ciò che la piattaforma consente tecnicamente e ciò che viene richiesto agli studenti. Sulla base delle esperienze condotte in ambienti immersivi educativi, è opportuno che gli obiettivi siano associati a parametri misurabili come tempi medi di completamento delle attività o percentuali di risposte corrette a test post-utilizzo (Arymbekov et al., 2024). Questi indicatori quantitativi facilitano la valutazione dell'efficacia didattica e permettono al team docente di monitorare il progresso individuale e collettivo. Si possono così individuare eventuali aree critiche da potenziare attraverso sessioni aggiuntive o modifiche ai contenuti aumentati. L'aspetto collaborativo merita attenzione nella definizione degli obiettivi: l'uso multiutente della Sandbox AR offre opportunità per traguardi legati non solo alla competenza individuale ma anche alla capacità di lavorare in gruppo su scenari simulati (Nye, 2015). Obiettivi come “realizzare un piano comune di gestione territoriale” richiedono sincronizzazione tra dispositivi diversi e coordinamento nelle azioni eseguite dagli studenti, elementi che contribuiscono allo sviluppo di competenze trasversali quali comunicazione, *problem-solving* e *leadership* condivisa. Nelle versioni avanzate della Sandbox AR integrata con modelli predittivi AI+GIS, gli obiettivi possono includere la capacità di interpretare simulazioni dinamiche correlate a dati reali. La definizione precisa diventa qui essenziale: comprendere un modello meteorologico proiettato sulla scena aumentata significa distinguere tra variabili stabili e parametri previsionali influenzati da input live provenienti da sensori esterni o UAV (Nex, Remondino, 2014). Tale distinzione supporta lo sviluppo del pensiero critico applicato alla lettura dei fenomeni complessi. La formulazione degli obiettivi deve anche tener conto dell'inclusività: prevedere traguardi intercambiabili o

adattabili garantisce che studenti con differenti abilità cognitive o sensoriali possano partecipare attivamente alle attività AR (Arymbekov et al., 2024). Ciò implica l'identificazione anticipata delle funzioni che necessitano modalità alternative di fruizione (comandi vocali, *gesture* semplificate) e la loro integrazione nei piani formativi ufficiali. Dal punto di vista pedagogico-metodologico, è consigliabile associare ad ogni obiettivo una mappa delle competenze che ne descriva le conoscenze teoriche sottostanti, le abilità pratiche correlate e gli atteggiamenti comportamentali auspicati entro la fine del percorso formativo. Questa impostazione rende trasparenti le aspettative verso gli studenti e facilita l'allineamento tra le attività programmate nella Sandbox AR e le verifiche periodiche effettuate dai docenti (Oberdörfer et al., 2021). Infine, la dimensione etica rientra nella definizione stessa degli obiettivi didattici quando l'applicativo prevede raccolta dati personali durante le sessioni immersive. L'inserimento esplicito della sensibilizzazione sulla privacy tra i traguardi formativi, ad esempio “acquisire consapevolezza sulle norme relative al trattamento dei dati in contesti tecnologici educational”, aumenta la responsabilità digitale degli studenti e rafforza la fiducia complessiva nel sistema (Arymbekov et al., 2024).

L'identificazione delle competenze target richiede di tradurre le finalità formative generali in abilità, conoscenze e attitudini specifiche che gli studenti devono acquisire al termine delle attività. Queste competenze possono essere distinte fra hard e soft skills, con la consapevolezza che l'ambiente immersivo offre opportunità per sviluppare entrambe in modo integrato. Le prime riguardano la capacità di utilizzare strumenti e procedure tecniche – ad esempio l'interpretazione di *layer* informativi geospaziali, la gestione dei controlli AR su dispositivi mobili o visori dedicati, l'interazione con modelli 3D collegati a dataset GIS in tempo reale – mentre le seconde si riferiscono a comportamenti trasversali come collaborazione, *problem solving* e comunicazione efficace durante attività multiutente (Nye, 2015). Un punto di partenza è la mappatura delle competenze già possedute dal target di riferimento. In questa operazione si considerano variabili quali il livello di alfabetizzazione digitale, l'esperienza pregressa con ambienti immersivi e la familiarità con concetti disciplinari

collegati agli scenari progettati nella Sandbox AR. La raccolta dati può avvenire mediante questionari iniziali o osservazioni dirette in contesti didattici tradizionali, così da delineare un profilo realistico del gruppo classe prima dell'introduzione della AR (Arymbekov et al., 2024). Ciò consente di stabilire obiettivi progressivi evitando una curva di apprendimento troppo ripida che potrebbe ridurre l'efficacia formativa complessiva. In ambito geografico e scientifico, competenze specifiche collegate al pensiero spaziale appaiono centrali: leggere correttamente coordinate geografiche ancorate alla scena aumentata, comprendere relazioni topologiche tra elementi naturali e infrastrutture umane o valutare impatti ambientali simulati su modelli territoriali modificabili in tempo reale (Nex, Remondino, 2014). Il contesto della Sandbox AR potenzia queste abilità consentendo manipolazioni dirette e visualizzazioni dinamiche difficilmente ottenibili in classe con soli strumenti tradizionali. Parallelamente è possibile includere tra le competenze target anche capacità analitiche nella decodifica dei dati provenienti da sensori esterni o UAV collegati alla piattaforma (Oberdörfer et al., 2021), traducendo feed complessi in azioni pratiche all'interno dello scenario aumentato. Le esperienze condotte su gruppi scolastici indicano che l'uso combinato di funzioni collaborative multiutente stimola lo sviluppo di abilità sociali avanzate. In un ambiente AR condiviso, gli studenti vengono spinti a coordinarsi per realizzare obiettivi comuni – come la pianificazione congiunta di un intervento urbanistico simulato – esercitando così competenze nella negoziazione e nella leadership distribuita (Nye, 2015). Tali capacità possono essere formalmente inserite fra i traguardi didattici, attribuendo loro pari dignità rispetto alle competenze tecnico-disciplinari. Alcuni ambiti disciplinari implicano anche skill legate alla rappresentazione grafica tridimensionale e alla modellazione concettuale di fenomeni; ad esempio saper scegliere il tipo più appropriato di proiezione cartografica o comprendere l'impatto che variazioni cromatiche possono avere nella leggibilità delle mappe aumentate (Bärthele, Sauer, Wilkening, 2023). L'attività didattica attraverso sandbox permette esercitazioni rapide su questi aspetti fornendo feedback immediati sulla riuscita della scelta effettuata. Vi rientrano anche nozioni basilari sul funzionamento degli algoritmi AI+GIS integrati:

senza alcuna pretesa di formare programmatori, gli allievi possono acquisire consapevolezza su come i sistemi predittivi elaborino i dati e quali siano i limiti interpretativi delle simulazioni mostrate (Soelistiono, Wahidin, 2023). La componente tecnica delle competenze target comprende inoltre padronanza nell'utilizzo degli strumenti AR previsti: regolare correttamente il campo visivo sul dispositivo impiegato, interagire con interfacce touch o *gesture-based* senza errori sistematici, mantenere stabilità durante sessioni prolungate evitando affaticamento visivo (Oberdörfer et al., 2021). Per operatori educativi o tecnici scolastici parte del target formativo può essere l'acquisizione di capacità gestionali: configurare sessioni multiple nell'infrastruttura AR, aggiornare asset digitali conformemente al curriculum o garantire la sicurezza dei dati generati dagli utenti nel rispetto della normativa vigente. Un ulteriore livello riguarda le meta-competenze legate alla cittadinanza digitale responsabile. Il lavoro in ambiente aumentato comporta spesso raccolta e scambio di dati personali; quindi capacità come riconoscere l'importanza del consenso informato, applicare buone pratiche per la protezione della privacy o valutare criticamente affidabilità delle fonti dovrebbero figurare tra i traguardi formativi espliciti (Arymbekov et al., 2024). Queste componenti hanno ricadute non solo tecniche ma etiche. Dal punto di vista metodologico, definire le competenze target significa anche assegnare priorità temporali alla loro acquisizione. Alcune possono essere sviluppate già nelle prime sessioni introduttive (ad esempio basi d'uso dell'interfaccia), altre richiedono esposizioni ripetute nel tempo per consolidarsi (capacità collaborative complesse). Per facilitare questo processo è utile schematizzare il percorso formativo indicando per ciascuna competenza livelli crescenti di padronanza – dall'uso elementare fino all'applicazione autonoma in scenari variabili (Oberdörfer et al., 2021). Infine va sottolineata l'opportunità di calibrare le competenze attese sulle risorse realmente disponibili: hardware non omogeneo nei diversi plessi scolastici o infrastrutture di rete limitate incidono sulle possibilità applicative concrete della AR. La valutazione iniziale dell'ambiente tecnologico permette di evitare discrepanze tra il profilo ideale dello studente formato

dalla Sandbox AR e le condizioni operative entro cui questo deve agire successivamente nella prassi quotidiana (Pavlova et al., 2023).

4.4 Architettura *hardware* e *software*: la scelta dei componenti e integrazione dei sistemi

La progettazione di ambienti di apprendimento immersivi per la Geografia, specificamente attraverso l'impiego di Sandbox AR (SbAR) e la sua evoluzione in fatto di simulatore idrodinamico *StreamBox* (StAR), trascende dalla semplice acquisizione di strumentazione digitale *off-the-shelf*; essa si configura, piuttosto, come un complesso esercizio di prototipazione dei sistemi che richiede una comprensione olistica delle interdipendenze tra la componente tangibile (hardware, materiali granulari – i media manipolabili –, i fluidi) e quella intangibile (algoritmi di modellazione, pipeline di rendering, software di gestione). Come evidenziato dalla letteratura recente, il rischio di ridurre l'innovazione tecnologica a un supermarket dell'inutile o, ancor peggio, a una «lista della spesa di prodotti da comprare» è mitigabile solo attraverso una rigorosa architettura sistemica che subordini la scelta dei componenti agli obiettivi epistemologici e didattici della geografia (Di Gioia, 2023).

In questo contesto, il presente capitolo analizza l'architettura hardware e software di tali sistemi, disaggregando le scelte progettuali che sottendono la transizione dai modelli statici a quelli dinamici e interattivi. L'analisi si focalizza sulla dicotomia tra sistemi chiusi e architetture *open-source*, esaminando come la modularità del codice (es. implementazioni Python e C-Sharp) e l'ibridazione mecatronica (integrazione con il sistema Arduino⁶⁰)

⁶⁰ Arduino è una piattaforma di prototipazione elettronica *open-source* che integra hardware e software progettati per essere accessibili anche a utenti privi di un background ingegneristico avanzato. Il sistema si compone di una scheda fisica dotata di microcontrollore (il “cervello” in grado di elaborare dati) e di un Software di sviluppo (Arduino IDE) per la scrittura del codice. Grazie alla sua architettura modulare, Arduino è in grado di rilevare l'ambiente circostante tramite sensori (input) e di agire su di esso controllando luci, motori o

influenzino la robustezza, la scalabilità e l'efficacia pedagogica dei cosiddetti «teatri geografici» (Di Gioia, 2023).

L'impulso primario che ha guidato la progettazione e la successiva realizzazione del dispositivo *SandBox Augmented Reality* (SbAR) presso il nostro ateneo non risiede in una mera fascinazione tecnocratica, bensì in una stringente necessità pedagogica: colmare il divario cognitivo ed esperienziale che separa gli studenti della Scuola Secondaria dalla comprensione profonda delle dinamiche geomorfologiche e ambientali. La letteratura di settore evidenzia come il pensiero spaziale tridimensionale⁶¹ sia una competenza essenziale per le geoscienze (Stocco, Botelho, 2025), spesso ostacolata dalla difficoltà di visualizzare processi che operano su vaste scale temporali e spaziali all'interno dei limiti fisici di un'aula scolastica (Wellmann et al., 2022). In risposta a tale esigenza, l'iter progettuale si è strutturato secondo una progressione bifasica: una prima istanza, prettamente analogica, mirava alla configurazione di un sistema di modellazione fisica capace di ricostruire prototipi ambientali tangibili attraverso la manipolazione della materia granulare, in continuità con la tradizione dei plastici utilizzati nella Didattica della Geografia (De Filpo, Grippo, 2023); la seconda fase, che ha sancito la genesi del sistema SbAR oggetto della presente disamina, ha operato un'ibridazione tra il substrato materiale e i caratteri della Realtà Aumentata (AR), integrando competenze digitali avanzate sull'impianto euristico iniziale.

L'obiettivo teleologico del sistema informatico implementato non era la sostituzione dell'esperienza tattile, bensì il suo “potenziamento” (*augmentation*): attraverso la sovrapposizione in tempo reale di *layer* informativi visivi (ipsometria cromatica, curve di livello) e dinamici (simulazioni idrologiche), l'utente viene facilitato nel processo di decodifica dell'oggetto geografico. Questo approccio si inserisce nel solco del costruttivismo, dove

attuatori (output), rendendolo lo standard *de facto* nella didattica STEM e nel *physical computing* per la realizzazione rapida di interfacce tangibili e strumenti interattivi.

⁶¹ Nella sua accezione più geografica, Cfr. *GeoReasoning* (Stocco, Botelho, 2025; Golledge, Marsh, Battersby, 2008)

l'apprendimento non è un'acquisizione passiva, ma una costruzione attiva basata sull'esperienza personale e sulla verifica continua delle ipotesi attraverso la manipolazione diretta (Woods et al. 2016; Petrasova et al. 2018).

Sebbene il panorama scientifico e commerciale internazionale offra soluzioni “chiavi in mano” – si pensi ai dispositivi distribuiti da *software house* statunitensi ed europee come *iSandBox* o *Arkansas Digital Sandbox* – la nostra scelta di perseguire una via autarchica, realizzando *in-house* il dispositivo anziché acquistarlo, risponde a due imperativi strategici ponderati. *In primis*, vi è una ragione di sostenibilità economica e replicabilità: la progettazione di un sistema autocostruito (*self-financed* e *handcrafted*) abbatte drasticamente le barriere all'ingresso per le istituzioni scolastiche, spesso gravate da budget limitati, offrendo un'alternativa concreta alla logica del “gran bazar” di acquisti tecnologici slegati da una reale programmazione didattica, come criticamente osservato nel contesto degli investimenti PNRR (Di Gioia, 2024); *in secundis*, l'investimento su un'architettura proprietaria e aperta garantisce una totale indipendenza da licenze restrittive e dall'obsolescenza programmata dell'hardware, concedendo al gruppo di ricerca la piena libertà di implementare sviluppi futuri, aggiornamenti e personalizzazioni del codice (Betti, Borghi, Virgini, 2023).

La costruzione prototipale del sistema, condotta all'interno del laboratorio di ricerca Tinc-TEC del Dipartimento di Scienze della Formazione, dei Beni Culturali e del Turismo dell'Università di Macerata, rappresenta l'adattamento situato di un progetto seminale avviato dai ricercatori dell'Università della California-Davis, sotto la guida del professor Oliver Kreylos. Tale progetto, nato da un finanziamento della *National Science Foundation*, ha stabilito lo standard *de facto* per l'integrazione di sensori di profondità e proiezione digitale in ambito geoscientifico (Reed et al. 2016). La nostra implementazione si configura come un sistema a circuito chiuso (*closed-loop system*) che orchestra la comunicazione tra una camera 3D e un videoproiettore per generare l'esperienza di realtà aumentata sulla superficie sabbiosa.

Dal punto di vista dell'architettura hardware, il sistema si articola su quattro nodi fondamentali – come mostrato in Figura 12 di seguito.

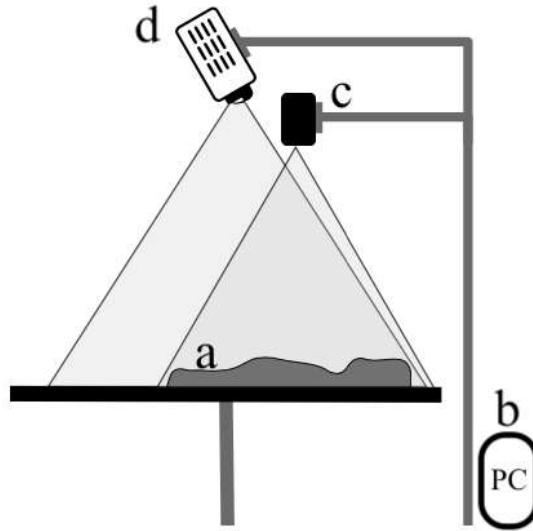


Figura 12. Schema del sistema hardware della Sandbox AR realizzata all'Università di Macerata. Elaborazione dell'autore.

La sinergia delle diverse componenti è condizione necessaria per la stabilità della proiezione olografica:

1. Il supporto fisico (a). Una struttura di contenimento (“scatola”) per la sabbia (o altri *media* da manipolare), che funge da interfaccia aptica primaria. La scelta del materiale granulare non è banale: come notato in letteratura, l'uso di sabbia cinetica o miscele specifiche può migliorare la coesione e la resa della proiezione, influenzando la qualità dell'interazione tattile e le possibilità di interazione-costruzione (Wellmann et al., 2022).
2. L'unità di elaborazione (b). Un PC operante su ambiente Windows, scelto per la sua robustezza e per la compatibilità con le librerie *open source* necessarie alla gestione

dei flussi dati tridimensionali e grafici, contenente il software della Sandbox AR deputato alla gestione dell'hardware, alla sua calibrazione e alle proiezioni.

3. Il sensore di profondità (c). Una telecamera 3D, nello specifico una Microsoft Kinect v1, montata in posizione zenitale rispetto al piano di lavoro. Questo sensore, originariamente concepito per l'industria videoludica, opera una scansione continua della topografia sabbiosa attraverso la tecnologia a luce strutturata o *Time-of-Flight*, rilevando in tempo reale le variazioni morfologiche impresse dall'utente (Reed et al. 2016).
4. Il sistema di output visivo (d). Un proiettore a focale corta, calibrato per sovrapporre con precisione millimetrica i gradienti cromatici e le isolinee calcolate dal software direttamente sul modello fisico, evitando ombreggiature parassite e garantendo l'immersività dell'esperienza.

Il funzionamento operativo del sistema si fonda su un ciclo continuo di retroazione (*feedback loop*). Il PC funge da nodo centrale di ricezione e trasmissione: i dati grezzi relativi alle quote della sabbia, acquisiti dal sensore Kinect V1, vengono processati dal software per generare un Modello Digitale di Elevazione (DEM) istantaneo. Come chiarito dalla letteratura tecnica, il DEM rappresenta la distribuzione delle quote di una superficie in formato *raster*, associando a ciascun pixel l'attributo relativo alla quota assoluta (Betti, Borghi, Virgini, 2023). Su questa base topografica virtuale, l'algoritmo applica una *shader pipeline* che calcola le colorazioni ipsometriche (dal blu delle depressioni al marrone dei rilievi) e simula fluidodinamicamente il comportamento dell'acqua (attraverso una simulazione digitale attivabile da specifica *gesture*). Il risultato visivo viene immediatamente proiettato sulla sabbia, creando un sistema responsivo in cui l'azione manuale dell'utente (scavare, accumulare) riceve una risposta visiva immediata, rinforzando il legame cognitivo tra azione e conseguenza geomorfologica (Figure 13 e 14).

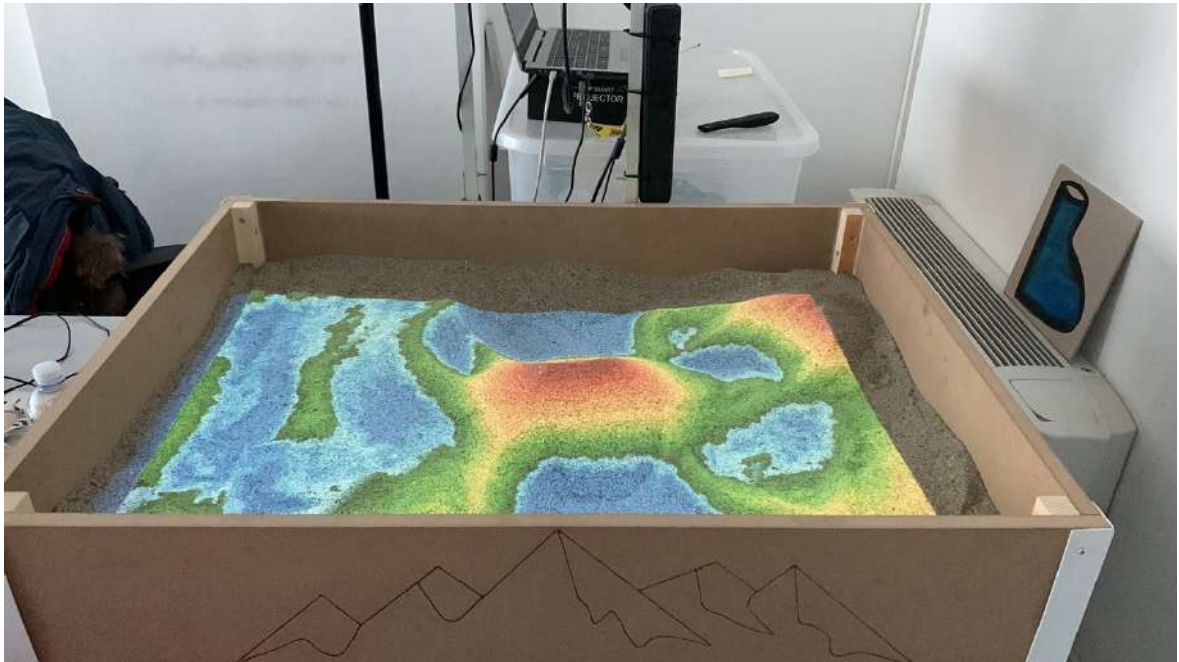


Figura 13. Immagine frontale della Sandbox AR costruita all'Università di Macerata in funzione. Dettaglio della proiezione dei colori.



Figura 14. Immagine dell'intera installazione della Sandbox AR dell'Università di Macerata. Costruzione dell'autore.

Il cuore pulsante di questa infrastruttura è il programma di gestione, un adattamento del codice sorgente elaborato dal team di Oliver Kreylos (Reed, et al. 2016; Woods et al. 2016; Lake, Tessler, 2019). L'operazione di *porting* e ottimizzazione condotta presso l'Università di Macerata non è stata un mero esercizio di compilazione; per garantire la compatibilità con l'hardware specifico in uso e per rispondere alle esigenze didattiche locali, è stato necessario riscrivere porzioni significative del codice. Abbiamo inoltre operato una semplificazione dell'interfaccia utente e delle *gestures* di controllo (come l'attivazione della pioggia virtuale tramite il posizionamento delle mani), rendendo l'interazione più intuitiva e immediata per un'utenza non specializzata, in linea con i principi di accessibilità suggeriti dalla letteratura recente (Betti, Borghi, Virgini, 2023). Questa flessibilità del software *open source* è un vantaggio cruciale rispetto alle soluzioni commerciali chiuse, poiché permette, come dimostrato anche da altre esperienze accademiche, l'integrazione futura di moduli avanzati, come la modellazione geologica 3D tramite librerie Python (es. GemPy) o la simulazione di rischi naturali (Wellmann et al., 2022).

Il primo stadio critico nell'architettura di una AR Sandbox è la digitalizzazione in tempo reale della superficie topografica modellata dall'utente. Questo processo, definito *sensing*, impone requisiti stringenti in termini di latenza, risoluzione spaziale e stabilità del segnale. Nell'architettura complessa che definisce la Sandbox AR (SbAR), la componente nevralgica deputata alla transcodifica della realtà fisica in dato digitale è rappresentata dal sistema di acquisizione della nuvola di punti (*point cloud*). La letteratura scientifica di settore identifica, in questa specifica giuntura tra hardware e software, una progressione tecnologica significativa che ha determinato l'evoluzione delle capacità di *sensing* e, conseguentemente, la fedeltà del Modello Digitale di Elevazione (DEM) generato in tempo reale. La tecnologia predominante per l'acquisizione della profondità si basa su sensori dedicati (*depth sensors*), la cui selezione non risponde meramente a criteri tecnici, ma influenza radicalmente l'accessibilità, la sostenibilità economica e la precisione del dispositivo didattico finale.

La genesi di questi strumenti, e in particolare delle prime installazioni prototipali che hanno fatto scuola nel panorama internazionale, risiede nella tecnologia a «luce strutturata» (*Structured Light*); questa metodologia, che ha caratterizzato la prima generazione di dispositivi di *motion sensing* di massa, trova la sua applicazione più celebre nel sensore Microsoft Kinect V1 (specificamente nei modelli 1414 e 1473). Il principio di funzionamento si basa sulla proiezione di un pattern pseudo-casuale di punti infrarossi (IR) sulla scena tridimensionale; la distorsione di tale pattern, letta da una camera IR CMOS situata a una distanza nota dal proiettore (parallasse), permette al sistema di triangolare la profondità di ogni singolo punto della superficie sabbiosa. Sebbene tale approccio si sia rivelato robusto per applicazioni *indoor* e in condizioni di luce controllata, esso soffre di intrinseche limitazioni fisiche, in particolare in presenza di luce solare diretta che, saturando lo spettro infrarosso, rende il pattern illeggibile, oltre a presentare una degradazione della risoluzione ai bordi dell'immagine acquisita.

Nonostante le limitazioni tecniche, la scelta di questa tecnologia ha rappresentato un punto fermo nelle nostre sperimentazioni presso l'Università di Macerata. Nel nostro percorso di ricerca, orientato verso la “costruzione artigianale del prototipo del sistema”, abbiamo optato per il *porting* dal progetto originale del team di Kreylos, basato proprio su questa architettura di sensori. La nostra Sandbox AR, concepita come sistema proprietario e non come assemblaggio commerciale, integra infatti una telecamera 3D (Microsoft Kinect V1/V2) posta in posizione orizzontale sopra al piano di lavoro (Betti, Borghi, Virgini, 2023). La persistenza nell'uso del Kinect V1, nonostante l'obsolescenza commerciale, risponde a una precisa istanza di sostenibilità e accessibilità: utilizzare *hardware* di facile reperibilità nel mercato dell'usato o del riciclo permette di mantenere bassi i costi, favorendo la replicabilità del sistema in contesti scolastici con risorse limitate. Tuttavia, l'integrazione di tale sensore in un ambiente operativo quale Windows o MacOS richiede una specifica cura nella gestione dei driver e nella riscrittura di parti del codice sorgente per garantire la compatibilità

hardware, operazione che abbiamo dovuto condurre per rendere il sistema stabile e reattivo (Betti, Borghi, Virgini, 2023).

L'evoluzione tecnologica successiva ha visto l'emergere della tecnologia *Time-of-Flight* (ToF), incarnata principalmente dal sensore Kinect V2 (Xbox One) e dalle sue iterazioni successive. A differenza della luce strutturata, che deduce la profondità dalla distorsione geometrica, la tecnologia ToF misura direttamente il tempo impiegato dai fotoni emessi da una sorgente luminosa (solitamente un impulso laser o LED modulato) per viaggiare verso l'oggetto e ritornare al sensore. Questo salto paradigmatico ha permesso di ottenere nuvole di punti significativamente più dense e stabili, riducendo drasticamente il rumore ad alta frequenza – spesso percepito come uno sfarfallio della superficie proiettata – e migliorando la risoluzione spaziale e la fedeltà cromatica della camera RGB integrata. Come notato nella letteratura tecnica comparata, sebbene il Kinect V1 sia stato il pioniere utilizzato come «*video game accessory*» poi adattato anche a questa ricerca, le versioni successive sono state introdotte per incrementare l'accuratezza delle misurazioni delle distanze e per creare migliori rilevazioni della sabbia all'interno del modello della Sandbox AR. Tuttavia, l'adozione del Kinect V2 ha comportato nuove sfide in termini di potenza di calcolo richiesta e compatibilità *driver*, spesso costringendo i ricercatori a bilanciare la qualità del dato acquisito con la stabilità operativa del sistema informatico di supporto, di cui anche la Sandbox AR dell'Università di Macerata è stata dotata. Sulla scia del progetto di ricerca avviato dalla RWTH Aachen University, il *porting* e l'implementazione del software maceratese ha seguito gli stessi sviluppi, appoggiandosi sulle parti di codice open-source distribuito (in Figura 15 la UX del software della Sandbox AR elaborato dal progetto RWTH Aachen University).

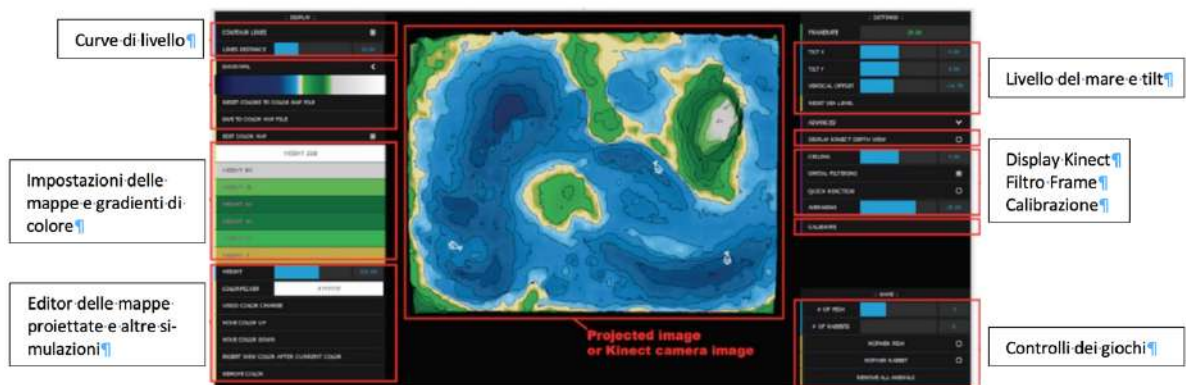


Figura 15. UX del software della Sandbox AR dell'Università di Macerata, elaborata a partire dal progetto di RWTH Aachen University. Elaborazione dell'autore.

La frontiera attuale, verso cui si stanno orientando le implementazioni più avanzate nel campo della *Geoscience Education*, è rappresentata dai sistemi LIDAR a «stato solido» (*Solid State Lidar*); questa tecnologia, che supera i limiti meccanici e di risoluzione dei precedenti sensori consumer, trova un'applicazione esemplare nell'architettura *Open AR-Sandbox* sviluppata dal già citato gruppo di ricerca della RWTH Aachen University. In questo contesto, l'integrazione di sensori come l'Intel RealSense L515 segna un punto di svolta: «In Open AR-Sandbox, we also integrated drivers for the newer generation Kinect sensors, as well as Realsense sensors, such as the L515 Lidar» (Wellmann et al., 2022). L'utilizzo di tecnologia Lidar offre una precisione millimetrica superiore e un fattore di forma ridotto, permettendo una calibrazione estremamente accurata delle micro-morfologie create dagli studenti. Questo livello di dettaglio non è puramente estetico, ma funzionale all'obiettivo didattico: una maggiore risoluzione nella scansione della sabbia consente di modellare e visualizzare con fedeltà fenomeni geomorfologici complessi su scala ridotta, riducendo la latenza tra l'azione aptica (lo scavo o l'accumulo di sabbia) e la risposta visiva del sistema (l'aggiornamento delle curve di livello o del flusso idrico simulato). Inoltre, l'architettura *Open Sandbox AR*, basata sul linguaggio Python, permette di superare il «collo di bottiglia» rappresentato dalla disponibilità dei driver per i vari sensori, offrendo un'interfaccia flessibile che supporta sia i sensori storici che le nuove tecnologie Lidar su molteplici sistemi

operativi (Windows, MacOS), ampliando così lo spettro di applicabilità dello strumento (Wellmann et al., 2022).

Questa modularità permette l'integrazione diretta con l'ecosistema scientifico di Python (SciPy Stack), abilitando funzionalità inedite come la modellazione geologica implicita tramite GemPy. In questo scenario, il software non si limita a colorare la sabbia in base all'altezza, ma calcola in tempo reale l'intersezione tra la superficie modellata e un modello geografico 3D (stratigrafia, faglie, idrografia), proiettando la mappa risultante. Questo trasforma l'hardware in un'interfaccia aptica per database geografici complessi (Wellmann et al., 2022; Betti, Borghi, Virgini, 2025).

Tabella 6. Principali confronti tra lo stato dell'arte tecnologico delle Sandbox AR. Elaborazione dell'autore.

Caratteristica	Software Legacy - SARndbox UC Davis	Sandbox AR Macerata e Open Sandbox AR RWTH Aachen University
Linguaggio Base	C++ / Shader GLSL	C-Sharp; Python (con wrapper C++)
Sistema Operativo	Prevalentemente Linux	Cross-Platform (Win, Mac)
Estensibilità	Bassa (richiede ricompilazione)	Alta (moduli Python, Jupyter Notebooks)
Modellazione 3D	Limitata a idrologia superficiale	Integrata (GemPy, PyGIMLi, Devito)
Interfaccia Utente	Menu tastiera/mouse	Widget interattivi (Panel), Gaming

La scelta della componentistica non è, quindi, un dettaglio tecnico marginale, ma una decisione strategica che influenza la natura stessa dell'esperienza didattica; se da un lato l'approccio "artigianale" basato su sensori *legacy* come il Kinect V1 – da noi adottato nel progetto maceratese – privilegia l'accessibilità economica e la filosofia del riciclo, permettendo una diffusione capillare dello strumento nelle scuole (Betti, Borghi, Virgini, 2023), dall'altro l'adozione di sensori Lidar di nuova generazione apre prospettive inedite per la simulazione avanzata di processi geofisici, rendendo la *SandBox AR* un vero e proprio laboratorio di modellazione geomorfologica interattiva.

4.5 Funzionalità e modelli geografici implementati: dalla topografia all'idrologia

L'evoluzione delle geotecnologie immersive applicate alla Didattica della Geografia, specificamente nel passaggio dalla configurazione classica della Sandbox AR alla più avanzata e versatile Streambox AR – entrambe prodotti di ricerca di questo percorso dottorale –, non si configura soltanto come aggiornamento di componenti *hardware* o *software*, bensì rappresenta una radicale riconfigurazione architeturale del sistema, necessaria per rispondere in modo olistico e sistematico alle complesse esigenze tecniche, pedagogiche e socio-economiche emerse durante l'applicazione didattica prolungata di tali strumenti. L'analisi di questa transizione tecnologica deve partire da un'osservazione critica delle implementazioni tradizionali della AR Sandbox, il cui prototipo seminale è riconducibile come stato dell'arte al progetto del *W.M. Keck Center for Active Visualization in the Earth Sciences* (Keck CA-VES) della *University of California, Davis*. Tale modello, concepito come un «ambiente 'open' per la manipolazione diretta della topografia fisica con sovrapposizione di dati digitali in tempo reale» (Reed et al. 2016), pur avendo dimostrato un'efficacia straordinaria nel visualizzare concetti geomorfologici complessi quali le curve di livello e l'idrologia di superficie, ha evidenziato criticità sostanziali che ne hanno frenato una diffusione capillare al di fuori dei centri di ricerca universitari o dei grandi musei della scienza. Le limitazioni operative riscontrate riguardano primariamente l'ingombro fisico delle strutture, spesso monolitiche e inamovibili, la necessità di attrezzature di calcolo e proiezione di fascia alta – e quindi costose –, le difficoltà logistiche di installazione in aule scolastiche standard non dedicate e i costi di manutenzione spesso proibitivi per le istituzioni scolastiche pubbliche (Betti, Borghi, Virgini, 2023; Dalim et al., 2017).

L'*upgrade* verso la Streambox AR (StAR) nasce, dunque, dall'applicazione rigorosa di principi ingegneristici orientati alla portabilità modulare, alla drastica riduzione della complessità *hardware* e all'adozione strategica di standard *open-source* per garantire la massima interoperabilità tra sistemi diversi. La nuova architettura proposta sostituisce la

componentistica fissa ed estremamente artigianale, con una struttura assemblabile in segmenti –profilati in alluminio standard e legno composito – dotata di sistemi di movimentazione su ruote che ne facilitano lo spostamento tra diversi ambienti scolastici, superando le barriere architettoniche e logistiche che spesso caratterizzano gli edifici scolastici storici o non modernizzati. Questa democratizzazione *dell'hardware* non implica un degrado delle prestazioni; al contrario, l'ottimizzazione delle risorse permette di utilizzare sensori di profondità ricondizionati, come i Microsoft Kinect v1 o v2, o moduli LIDAR *consumer-level* di nuova generazione come Intel RealSense L515, che offrono una risoluzione spaziale adeguata alle finalità didattiche a una frazione del costo dei sensori industriali (Wellmann et al., 2022). Parallelamente, l'adozione di proiettori LED a focale corta e ad alta efficienza energetica, calibrati specificamente per assicurare una resa visiva ottimale – in termini di contrasto e saturazione dei colori topografici – anche in condizioni di illuminazione ambientale tipiche delle aule scolastiche, elimina la necessità di oscurare completamente gli ambienti, facilitando l'integrazione delle attività laboratoriali nel normale flusso delle lezioni curricolari (Bärthele et al., 2023).

L'unità di calcolo, cuore pulsante del sistema, si basa ora su PC consumer di fascia media, resi pienamente compatibili con il software *open-source* elaborato per la Sandbox AR grazie all'ottimizzazione dei *driver*, che garantiscono stabilità e un accesso diretto alle risorse della GPU per il calcolo parallelo necessario alle simulazioni fluidodinamiche. Questa scelta non solo abbate i costi, ma garantisce anche una notevole estendibilità del sistema mediante *plugin* GIS personalizzati, permettendo di adattare lo strumento a specifici obiettivi didattici che variano dalla geografia fisica alla pianificazione territoriale. Come sottolineano diverse ricerche nel campo delle tecnologie educative, «soluzioni hardware agili e modulari favoriscono una maggiore replicabilità nei contesti educativi decentralizzati» (Quintero et al., 2019), aprendo scenari concreti per l'inserimento stabile e non episodico della piattaforma nei curricula di Geografia e Scienze della Terra. Le motivazioni pedagogiche sono inestricabilmente legate a tale riprogettazione tecnica: la maggiore mobilità consente attività

itineranti tra plessi e classi, l'impiego in laboratori polivalenti e la partecipazione ad eventi comunitari o collaborazioni interscolastiche, trasformando lo strumento da “monumento tecnologico” a risorsa condivisa e dinamica.

Un ulteriore elemento distintivo della Streambox AR è l'integrazione dei simulatori geografici dinamici *low-cost*, che agiscono come veri catalizzatori di scalabilità funzionale. Non limitandosi alla sola proiezione di curve di livello, il sistema integra modelli idrologici semplificati – basati sulle equazioni di Saint-Venant per le acque basse⁶² –, effetti meteorologici interattivi quali pioggia, neve e variazioni stagionali controllate dall'utente, e *overlay* tematici basati su *dataset* climatici *open-access* o *layer* urbani per analizzare gli impatti antropici sul territorio. L'approccio modulare consente adattamenti gradualmente alle competenze degli studenti: dalla visualizzazione altimetrica elementare nella scuola primaria, utile per comprendere i concetti base di rilievo e depressione, all'integrazione di dati geospaziali complessi nei licei e nelle università, come supporto a laboratori STEM avanzati e progetti interdisciplinari di gestione del territorio. Esempi pratici illustrano la trasversalità e la sostenibilità economica del modello: scuole meno dotate a livello tecnologico potrebbero condividere una singola unità Streambox AR tra più sedi settimanali riescono a ridurre fino al 60% i costi iniziali grazie all'utilizzo di componentistica locale e alla condivisione delle risorse; gli istituti tecnici potrebbero integrare la strumentazione nei percorsi PCTO (Percorsi per le Competenze Trasversali e per l'Orientamento), raccogliendo e visualizzando dati ambientali nell'ambito di progetti di *citizen science*⁶³; reti educative transfrontaliere ne potrebbero

⁶² Sotto il profilo dell'analisi spaziale, la metodologia adottata supera la semplice intersezione geometrica tra volumi d'acqua e topografia (curve di livello). Il sistema implementa una simulazione dinamica dei processi di deflusso superficiale basata sulle equazioni di Saint-Venant. Questo modello matematico descrive il comportamento dei fluidi quando la loro profondità è ridotta rispetto all'estensione orizzontale (come nel caso di fiumi o esondazioni), governando i principi di conservazione della massa e della quantità di moto. In termini territoriali, ciò significa calcolare non solo il volume d'acqua, ma come la sua energia si distribuisce e si dissipa interagendo con la rugosità del suolo. In questo modo è possibile ricostruire la propagazione dei flussi all'interno del bacino, analizzando l'interazione evolutiva tra la massa idrica e la morfologia del paesaggio, anziché restituire una rappresentazione meramente statica e altimetrica delle aree potenzialmente sommerse.

⁶³ La *Citizen Science* (Scienza dei Cittadini) indica il coinvolgimento del pubblico non esperto nella raccolta e analisi di dati scientifici, spesso attraverso piattaforme digitali collaborative, contribuendo al monitoraggio ambientale diffuso (Goodchild, 2007).

sfruttare le potenzialità per condividere osservazioni geomorfologiche fra contesti culturali differenti, superando le barriere linguistiche tramite interfacce vocali multilingua e visualizzazioni universali (Betti, Borghi, Virgini, 2023). In tali scenari, la versatilità della struttura permette interventi formativi inclusivi, con modalità multi-lato che favoriscono la collaborazione simultanea in piccoli gruppi e interfacce vocali pensate per studenti con difficoltà visive o linguistiche. Sul piano dell'accessibilità, il design leggero ed ergonomico consente l'utilizzo anche da parte di studenti con mobilità ridotta, mentre l'interfaccia vocale riduce le barriere d'uso tecnologico in contesti multiculturali, allineandosi alle linee guida internazionali sull'educazione aperta ed equa. In sintesi critica, la Streambox AR incarna una convergenza virtuosa fra innovazione tecnologica low-cost e progettualità educativa sostenibile (Chiappini et al. 2014); conservando la potenza immersiva legata alla realtà aumentata virtuale, aggiunge sistemi di modellazione e simulazione fisici per l'idrologia.

5. Gli upgrade tecnologici: dalla Sandbox AR alla Streambox AR per simulatori low-cost

5.1 La Streambox AR: l'upgrade per un simulatore geografico dinamico

L'evoluzione della ricerca sulle geotecnologie applicate alla didattica, che ha visto nel progetto della Sandbox AR (SbAR) un primo fondamentale traguardo, ci ha condotto inevitabilmente a confrontarci con i limiti intrinseci della modellazione statica. Sebbene la SbAR abbia dimostrato una straordinaria efficacia nel rendere tangibili concetti topografici astratti, permettendo la manipolazione diretta delle isoipse e delle forme del rilievo, la rappresentazione dei processi dinamici – in particolare quelli legati all'idrosfera – rimaneva confinata in una dimensione simulativa puramente digitale. La letteratura scientifica di settore sottolinea come la comprensione profonda delle dinamiche geomorfologiche, quali l'evoluzione dei profili costieri o la morfogenesi fluviale, richieda un salto cognitivo che trascenda la semplice osservazione di una superficie statica su cui vengono proiettati flussi virtuali; è

necessario, piuttosto, recuperare quella dimensione esperienziale che connette l'intuizione alla razionalità, permettendo allo studente di percepire fisicamente le forze in gioco. In questo orizzonte epistemologico si colloca la genesi della StreamBox AR (StAR), un dispositivo concepito non soltanto come appendice della SbAR, ma come sistema ibrido avanzato che reintroduce la “meccanica dei fluidi” reale all'interno dell'ambiente di realtà aumentata, trasformando la simulazione in un laboratorio di osservazione fenomenologica diretta.

La necessità di sviluppare uno strumento come la StAR nasce dalla constatazione che l'apprendimento di processi trasformativi diacronici, come l'erosione costiera e il trasporto solido fluviale, risultano tra gli apprendimenti più ostici per gli studenti della scuola secondaria, come emerge anche dal *Corpus degli apprendimenti geografici complessi* elaborato in questo lavoro di ricerca. Le uscite sul terreno, pur rimanendo insostituibili, offrono spesso una “fotografia” dello stato attuale del paesaggio, rendendo difficile per il discente visualizzare l'evoluzione temporale dei fenomeni o le relazioni di causa-effetto che li governano. D'altro canto, le simulazioni puramente digitali, pur essendo scientificamente accurate, rischiano di indurre una forma di distacco cognitivo, riducendo l'esperienza a una fruizione passiva su schermo che non attiva pienamente le leve dell'apprendimento sensomotorio e dell'engagement emotivo. La nostra risposta a queste criticità si è concretizzata nella progettazione di un *hardware* proprietario che integra la plasticità del *medium* granulare con l'azione fisica dell'acqua, il tutto orchestrato da sistemi meccatronici di controllo e arricchito dal *layer* informativo della realtà aumentata. Questa scelta strategica di non affidarsi a soluzioni commerciali preesistenti, come i costosi *Wavetank* industriali o i kit didattici statunitensi, risponde a una precisa etica della ricerca: garantire la replicabilità, la sostenibilità economica e l'adattabilità dello strumento ai diversi contesti scolastici, svincolandosi dalle logiche di mercato che spesso rendono tali tecnologie inaccessibili.

L'architettura della StAR rappresenta una rivisitazione radicale del concetto di Sandbox AR; la vasca di contenimento, elemento centrale del dispositivo, abbandona l'opacità del legno

o del metallo per adottare materiali plastici trasparenti. Questa modifica strutturale non è soltanto estetica, ma funzionale: la trasparenza permette l'osservazione laterale e stratigrafica dei processi di sedimentazione e di infiltrazione, offrendo una "sezione geologica" in tempo reale che sarebbe altrimenti invisibile. All'interno della vasca, la matrice granulare viene arricchita e diversificata; alla tradizionale sabbia quarzifera o di fiume, si affiancano graniglie polimeriche e resinose a granulometria calibrata e colorazioni differenziate (Figura 16). Tale eterogeneità materica è fondamentale per simulare con verosimiglianza le diverse risposte dei terreni all'azione erosiva dell'acqua, permettendo di visualizzare fenomeni di selezione granulometrica e di trasporto differenziale che sono alla base della sedimentologia.

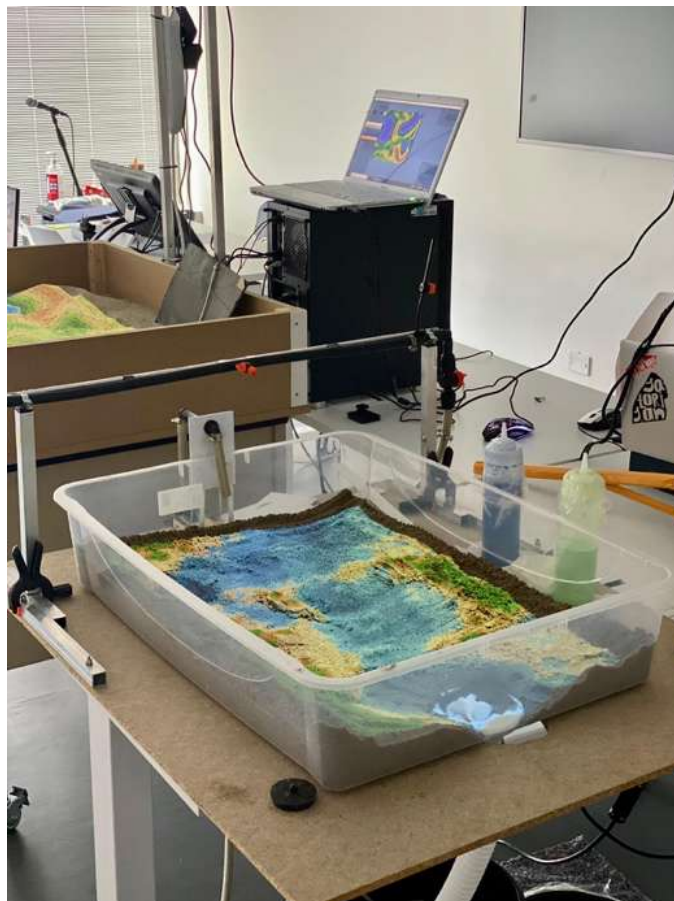


Figura 16. Uno dei possibili setting della Streambox AR realizzata all'Università di Macerata. In foto: simulatore di precipitazioni atmosferiche, simulatore fluviale e le evoluzioni tecniche dell'hardware del sistema. Costruzione dell'autore.

Il cuore pulsante dell'innovazione risiede nell'integrazione di due sistemi di simulazione meccanica, distinti ma complementari, che trasformano la scatola in un teatro geomorfologico attivo. Il primo modulo è dedicato alla simulazione del moto ondoso e delle dinamiche litoranee. Dal punto di vista ingegneristico, questo sistema si avvale di una pala rigida montata su un albero orizzontale, sostenuto da una struttura modulare in profilati di alluminio. Il movimento è generato da un motore passo-passo (*stepper*) controllato digitalmente, che trasmette la forza attraverso un sistema di riduzione a puleggia e cinghia (Figura 17 e Figura 18). Questa configurazione permette di generare treni d'onda con frequenza, ampiezza e periodo variabili e controllabili con precisione.

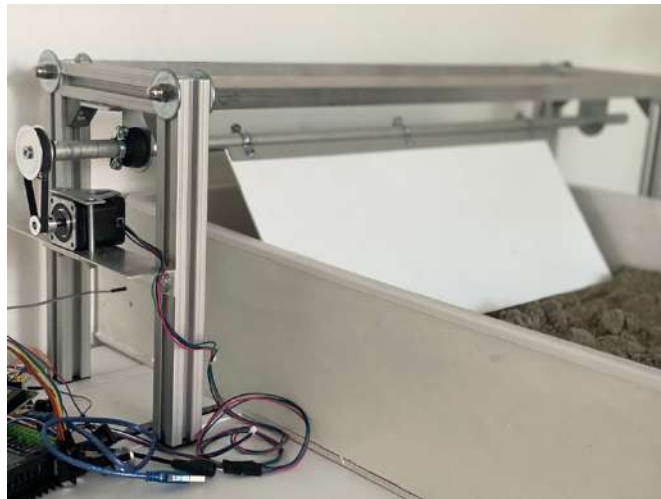


Figura 17. Immagine del simulatore del moto ondoso dell'Università di Macerata. Costruzione dell'autore.

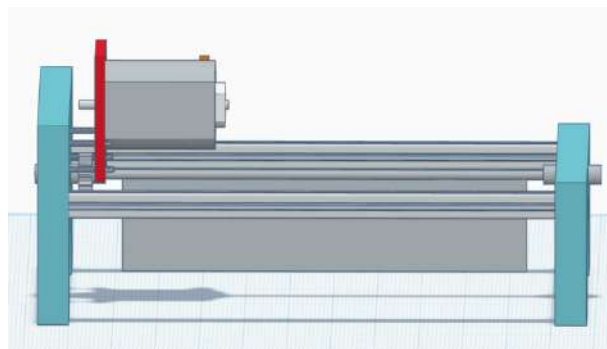


Figura 18. Prototipo progettato in 3D per la realizzazione del simulatore del moto ondoso. Elaborazione dell'autore.

L'impatto didattico di tale meccanismo è notevole: gli studenti non si limitano a osservare un'animazione proiettata di onde che si infrangono su una costa virtuale, ma vedono onde reali d'acqua che impattano su un litorale sabbioso reale, erodendo la falesia, trasportando i sedimenti lungo la deriva litoranea e depositandoli in zone di calma, modificando fisicamente la morfologia della costa sotto i loro occhi.

Parallelamente, il secondo modulo affronta la simulazione dei processi fluviali e del ciclo idrologico attraverso un circuito idraulico a ciclo chiuso. Una pompa a immersione a bassa tensione, collocata in un serbatoio di recupero sottostante la vasca principale, alimenta un sistema di tubazioni flessibili e valvole deviatrici elettro-attuate. Questo apparato consente di simulare due distinte fenomenologie: il deflusso incanalato, tipico dei corsi d'acqua, e le precipitazioni meteoriche diffuse. Per quest'ultime, abbiamo adottato soluzioni derivate dall'irrigazione di precisione, utilizzando micro-nebulizzatori che permettono di distribuire l'acqua in modo uniforme sul bacino idrografico modellato, simulando eventi piovosi di diversa intensità. Un elemento di particolare interesse didattico è la possibilità di introdurre nel circuito coloranti traccianti: questa funzionalità permette di visualizzare in modo lampante fenomeni altrimenti invisibili, come la dispersione degli inquinanti in un corso d'acqua, il trasporto in sospensione o la propagazione di un pennacchio di torbida alla foce di un fiume, collegando così la geomorfologia alle tematiche urgenti dell'inquinamento ambientale e della tutela delle risorse idriche (Figure 19 e 20).



Figura 19. Costruzione dei micro-nebulizzatori per la simulazione delle piogge nella Streambox AR dell'Università di Macerata. Costruzione dell'autore.



Figura 20. Particolare del simulatore di onde del mare nella Streambox AR dell'Università di Macerata, durante una lezione sull'erosione marittima all'Università di Macerata. Elaborazione dell'autore.

La gestione di questa complessità mecatronica è affidata a una scheda microcontrollore Arduino Mega. La scelta di questa piattaforma *open hardware* non è casuale, ma risponde alla volontà di rendere il sistema accessibile e modificabile anche in contesti didattici orientati alle discipline STEM, dove la programmazione e l'elettronica sono parte integrante del curriculum. Attraverso un'interfaccia fisica intuitiva, composta da potenziometri e pulsanti e supportata da un display LCD per la visualizzazione dei dati, docenti e studenti possono agire come variabili indipendenti del sistema. Essi possono modificare in tempo reale parametri idrologici cruciali come la portata del fiume (espressa in litri al minuto) o le caratteristiche del moto ondoso, osservando immediatamente la risposta morfologica del sistema. Questo *feedback loop* immediato tra azione sui parametri di controllo e reazione del modello fisico è ciò che distingue la StAR da qualsiasi simulatore software: la tangibilità dell'acqua che scava la sabbia, la resistenza fisica dei materiali, l'imprevedibilità intrinseca dei fluidi reali conferiscono all'esperienza una veridicità e una potenza esplicativa uniche.

In questo ecosistema ibrido, la componente di Realtà Aumentata non scompare, ma evolve, assumendo una funzione di supporto analitico e di potenziamento informativo. Mentre la meccanica gestisce la fenomenologia fisica, il sistema di proiezione e *sensing* (basato su sensori come il Microsoft Kinect e gestito dal *software* della Sandbox AR) sovrappone alla realtà materiale strati di informazione che rendono leggibili i processi in atto. Il sistema proietta sulla superficie in evoluzione gradienti ipsometrici che evidenziano le quote, curve di livello che si aggiornano dinamicamente man mano che l'erosione modifica il rilievo, e simulazioni vettoriali che mostrano la direzione e la velocità teorica delle correnti. In questo modo, la StAR colma il divario cognitivo tra il fenomeno fisico osservato (l'acqua che erode la sponda) e la sua rappresentazione cartografica astratta e codificata. Lo studente vede l'erosione accadere, ma vede contemporaneamente come essa viene rappresentata sulla carta topografica, costruendo un ponte semantico immediato tra realtà e modello.

L'efficacia didattica di questo approccio integrato è emersa con forza durante le fasi di sperimentazione condotte nelle scuole secondarie e nei contesti di formazione docenti. Le osservazioni sul campo hanno rilevato come l'uso della StAR incrementi significativamente l'*engagement* e l'*involvement* degli studenti. Non si tratta solo di fascinazione tecnologica, ma di un coinvolgimento epistemico profondo: la possibilità di “sporcarsi le mani” manipolando la sabbia, di regolare i flussi d'acqua, di costruire argini e vederli cedere sotto la pressione della corrente, attiva processi di apprendimento *learning-by-doing* che radicano le conoscenze teoriche nell'esperienza vissuta. Questo approccio risponde pienamente alle istanze della “geografia emozionale” e inclusiva, che vede nell'esperienza diretta e nella multisensorialità (tattile, visiva, uditiva) le chiavi per un apprendimento significativo e duraturo. Inoltre, la natura collaborativa dell'interazione con la StAR, che spesso richiede il coordinamento tra chi modella il terreno, chi controlla i parametri idraulici e chi osserva i dati in AR, favorisce lo sviluppo di competenze trasversali di *problem solving* e lavoro di squadra, essenziali nella formazione del cittadino contemporaneo.

5.2 Modelli di simulazione: idrologia, meteorologia, sismi

In continuità con le funzionalità generali e l'architettura modulare delineate nelle sezioni precedenti, l'evoluzione della StreamBox AR si distingue per l'integrazione avanzata di modelli computazionali dedicati alla simulazione idrologica e meteorologica che operano rigorosamente in tempo reale. Questi modelli si sincronizzano costantemente, frame dopo frame, con la morfologia fisica modellata dagli utenti nella vasca di sabbia, garantendo un'esperienza di feedback immediato che è alla base dell'efficacia didattica dello strumento. Tali moduli ampliano l'esperienza immersiva ben oltre la mera rappresentazione altimetrica statica – limitata alla colorazione ipsometrica e alle curve di livello –, introducendo la

visualizzazione di processi dinamici complessi direttamente sulla superficie modellabile, trasformando la sabbia in un laboratorio idraulico virtuale.

Dal punto di vista *logico-computazionale*, il modello idrologico implementato si basa tipicamente su una versione semplificata e ottimizzata per l'esecuzione su GPU delle equazioni di Saint-Venant, note anche come *Shallow Water Equations* (SWE); a queste, che permettono la renderizzazione digitale dei modelli idrologici, si aggiungono i simulatori fisici che introducono tra i mediatori della Streambox AR oltre alla sabbia anche l'acqua. Il sistema utilizza i dati tridimensionali di profondità acquisiti dal sensore (Kinect o LIDAR) per generare una mappa delle quote (*Digital Elevation Model* - DEM) aggiornata a ogni frame di elaborazione, tipicamente a 30 frame al secondo (Reed et al. 2016; De la Varga et al. 2019; Betti, Borghi, Virgini, 2025). Su questa mappa altimetrica dinamica, il sistema calcola le differenze di quota tra celle adiacenti della griglia virtuale per stimare il gradiente locale e la direzione del deflusso superficiale. Il flusso d'acqua viene quindi determinato applicando un coefficiente di velocità proporzionale alle differenze altimetriche e alla viscosità simulata del fluido, aggiornando iterativamente la *Water Height Map* (mappa dell'altezza dell'acqua) ed evitando valori fisicamente inconsistenti – come altezze negative – attraverso vincoli logici preimpostati nel solver numerico (Bärthele et al., 2023). In questo modo, l'acqua segue percorsi coerenti con la topografia istantanea creata dagli utenti: un piccolo avvallamento scavato dallo studente viene immediatamente riconosciuto come bacino di accumulo o lago, mentre pendenze accentuate o canali scavati accelerano lo scarico dell'acqua verso le quote inferiori, simulando torrenti e fiumi in piena.

La simulazione meteorologica lavora in stretta sinergia con quella idrologica, agendo come generatore di input per il sistema. Eventi come precipitazioni piovose o nevose sono generati da comandi manuali (pulsanti fisici per l'attivazione del circuito idrico e interfaccia digitale di controllo), vocali o gestuali (es. aprendo la mano sopra la sabbia per far “piovere” in un punto specifico) e applicati come input distribuiti sulla carta delle altezze dell'acqua (Bärthele et al., 2023). L'intensità della pioggia è modulabile dal docente o dagli studenti tramite

parametri nel *software*, permettendo di simulare da piogge leggere a eventi alluvionali estremi, come le cosiddette “bombe d’acqua”. La caduta delle precipitazioni incrementa localmente la quantità di acqua nel modello, che poi entra immediatamente nei calcoli del deflusso superficiale.

L’interazione tra morfologia fisica e simulazioni avviene in un ciclo continuo di *feedback* (*closed-loop*): ogni manipolazione materiale della sabbia registra variazioni nella mesh altimetrica rilevata dal sensore; il motore di calcolo fisico aggiorna quasi istantaneamente i percorsi, le velocità e i volumi d’acqua; e il proiettore aggiorna il colore, la texture e il movimento del fluido virtuale sulla sabbia. Allo stesso modo, cambiamenti repentini nelle condizioni meteorologiche simulate (es. un improvviso temporale) modificano rapidamente lo stato idrico del modello, rendendo visivamente evidenti gli effetti combinati della forma del terreno (pendenza, concavità) e dell’apporto pluviometrico (Betti, Borghi, Virgini, 2025). Il sistema supporta anche l’inserimento di elementi virtuali aggiuntivi, come dighe, argini o barriere, posizionabili come overlay grafici o oggetti fisici riconosciuti dal sistema, che alterano i flussi idrici secondo parametri idraulici impostati, permettendo di simulare l’impatto di infrastrutture antropiche sul ciclo dell’acqua.

Sul piano didattico, queste simulazioni in tempo reale possiedono un valore formativo elevatissimo, poiché permettono di passare dalla concettualizzazione teorica e astratta dei fenomeni idrogeologici alla loro osservazione diretta e manipolabile in un ambiente controllato e sicuro. Gli studenti possono: verificare empiricamente l’effetto delle pendenze sulla velocità di deflusso e sul tempo di corrivazione; osservare la formazione, la connessione e l’evoluzione dei bacini idrografici a seguito di modifiche intenzionali del rilievo; valutare scenari “*what-if*” variando l’intensità e la distribuzione delle precipitazioni (es. “cosa succede se piove il doppio in metà tempo?”); discutere e testare scelte progettuali di mitigazione del rischio (es. collocazione di argini, canali di scolmo, dighe) valutandone gli effetti immediati sulla sicurezza del territorio simulato (Zanolin, Gilardi, De Lucia 2017; Çöltekin et al. 2020). Dal punto di vista pedagogico-operativo, l’aggiornamento in tempo reale crea un

fortissimo legame cognitivo di causa-effetto fra l'azione fisica dello studente (es. scavare, accumulare) e la risposta visiva del sistema (es. l'acqua scorre, si ferma, esonda): colmare un avvallamento riduce istantaneamente l'accumulo simulato; introdurre una barriera devia il corso dell'acqua proprio come mostrato dall'animazione proiettata. Questa immediatezza stimola l'apprendimento esperienziale (*learning by doing*), il *problem solving* situato e l'esplorazione autonoma mirata agli obiettivi curricolari. Inoltre, i modelli possono essere scalati e semplificati per livelli scolastici inferiori – concentrandosi su concetti base come la gravità e il flusso – o resi più complessi, ad esempio introducendo parametri di permeabilità superficiale, infiltrazione o evapotraspirazione, in contesti formativi avanzati, universitari o interdisciplinari.

L'integrazione dei modelli idrologico e meteorologico nella Streambox AR traduce, quindi, la morfologia fisica manipolata dagli utenti in una scena dinamica e reattiva che evolve secondo regole fisiche semplificate ma scientificamente coerenti. L'effetto educativo nasce dalla possibilità unica di sperimentare in tempo reale le interrelazioni sistemiche tra l'assetto geomorfologico del territorio e gli elementi climatici simulati, trasformando la sandbox da semplice strumento illustrativo statico a vero e proprio laboratorio geografico interattivo, capace di affrontare tematiche complesse come il rischio idrogeologico e la gestione delle risorse idriche con modalità accessibili, coinvolgenti e scientificamente fondate (Bärthele et al., 2023; Zanolin, Gilardi, De Lucia, 2017; Çöltekin et al. 2020).

Facendo seguito all'analisi dei modelli idrologici e meteorologici in tempo reale illustrata in questa tesi, l'evoluzione funzionale della Streambox AR ha previsto anche l'integrazione avanzata di moduli *software* e *hardware* dedicati alla rappresentazione e simulazione di processi geologici profondi e sismici. Questi modelli completano la gamma di fenomeni terrestri simulabili, estendendo l'uso dello strumento a contesti formativi che abbracciano la geografia fisica avanzata, la geologia strutturale, la geofisica e la gestione del rischio sismico, tentando di offrire una visione olistica delle dinamiche terrestri che integra superficie e sottosuolo.

Dal punto di vista tecnico, i modelli geologici sono stati sviluppati sfruttando pipeline software sofisticate, derivate spesso da librerie open-source come GemPy – un *toolkit* Python per la modellazione geologica 3D implicita – o ambienti simili (Wellmann et al., 2022); anche in questo caso, l’unione tra simulazione digitale e fisica è la scelta applicata dal gruppo di ricerca maceratese nello sviluppo di questi upgrade. In questa configurazione, la morfologia superficiale plasmata fisicamente dai partecipanti nella sabbia viene arricchita da stratigrafie virtuali generate digitalmente a partire da set di dati predefiniti o personalizzabili, che includono strati inclinati, pieghe, faglie, anticlinali, sinclinali e discordanze (Wellmann et al. 2022). Il motore di rendering 3D interpola le superfici geologiche a profondità variabile nel sottosuolo virtuale e ne proietta le sezioni tagliate dall’intersezione con la topografia fisica direttamente sulla sabbia (creando una carta geologica dinamica in tempo reale) o su schermi ausiliari (mostrando sezioni trasversali o blocchi diagramma 3D). In questo modo, lo studente può collegare visivamente e concettualmente l’assetto superficiale (topografia) con le strutture sotto-superficiali invisibili (stratigrafia, tettonica). In configurazioni più complesse e avanzate, è possibile importare *shapefile* geologici reali, dati di sondaggi o mappe strutturali per sovrapporre alla topografia creata informazioni litologiche o tettoniche specifiche di un’area reale, offrendo uno scenario multidimensionale e ancorato alla realtà locale.

Per quanto riguarda la componente *sismica*, alcune implementazioni avanzate della Sandbox e Streambox AR hanno adottato interfacce con pacchetti di calcolo numerico *open-source* come *Devito* – per la propagazione di onde mediante differenze finite – o pyGIMLi per simulare la fisica della propagazione delle onde sismiche attraverso il modello fisico-digitale (Wellmann et al., 2022). La superficie rilevata dal sensore tridimensionale viene interpretata come una distribuzione spaziale di velocità sismica (associando ad esempio diverse velocità a diverse “altezze” o litologie simulate); sorgenti sismiche virtuali, posizionabili dagli utenti tramite *marker* fisici come i codici ArUco o tramite gesti, generano treni d’onda P ed S virtuali che si propagano attraverso il mezzo. Queste onde sono visibili come animazioni

proiettate (fronti d'onda) che si irradiano, si riflettono e si rifrangono sul rilievo e nel sotto-suolo simulato. Variazioni nell'assetto topografico o la presenza di discontinuità geologiche impostate nel modello (faglie, cambi di densità) alterano le traiettorie, le velocità e le ampiezze delle onde, permettendo analisi qualitative ma fisicamente fondate sull'effetto della morfologia e delle strutture geologiche sui movimenti sismici (es. effetti di sito, amplificazione topografica). Alle elaborazioni digitali si affianca l'uso di tavole vibranti (*shake tables*) fisiche⁶⁴ integrate direttamente nel modello che permettono di osservare gli effetti dello scuotimento su modellini di edifici posti sulla sabbia, o rilevare le onde sismiche attraverso un sismografo digitale programmato in Arduino, introducendo concetti di ingegneria sismica e geografia dei suoli (Betti, Borghi, Virgini, 2023) (Figura 21).

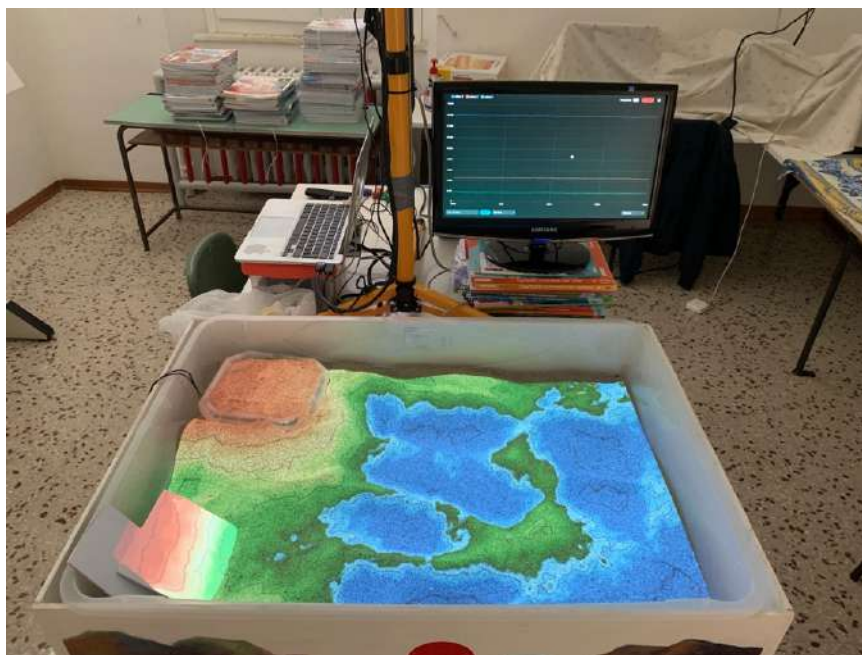


Figura 21. Setting d'aula della Streambox AR dell'Università di Macerata in modalità simulatore di terremoti. Oltre alla tavola vibrante (in alto a sinistra), è evidenziato il sismografo digitale che proietta i tracciati sismici sul monitor. Costruzione dell'autore.

⁶⁴ Queste sono realizzate a partire dal riciclo di materiali e dal lavoro in laboratorio. Sfruttando i concetti derivanti dalla fisica e dall'elettronica, si costruiscono tavole vibranti a partire dal riutilizzo di vecchi speaker audio a cui viene impartita una quantità variabile di corrente al di sotto di 50 KHz. Più si aumenta l'intensità di corrente, più sarà forte la vibrazione dello speaker e di conseguenza la simulazione fisica del sisma.

Le modalità di interazione ricalcano il principio fisico–digitale (*tangible user interface*) della Sandbox AR: la manipolazione diretta della superficie sabbiosa consente agli utenti di preparare scenari didattici variando le forme del terreno e gli assetti ipotetici delle unità rocciose (es. scavare per rivelare uno strato più antico; creare una collina per simulare un’anticlinale); gli input fisici (la tavola vibrante realizzata) attivano eventi dinamici (scosse sismiche di diversa magnitudo e profondità, variazioni nell’inclinazione degli strati) che modificano dinamicamente la visualizzazione proiettata. L’utente può quindi intervenire simultaneamente sulla causa (modifica morfologica/strutturale) e osservare l’effetto immediato in termini di risposta sismica, distribuzione degli affioramenti o deformazione degli strati.

Il valore educativo di queste simulazioni è notevole, risiedendo soprattutto nella possibilità di rendere tangibili e visibili processi che avvengono su scale temporali geologiche o nel sottosuolo profondo, spesso presentati solo in forma teorica o tramite diagrammi statici 2D. Per i fenomeni geologici statici, la visualizzazione integrata superficie–sottosuolo aiuta a comprendere concetti spaziali complessi come la regola dei “V” nelle valli, la continuità stratigrafica, l’interferenza tra morfologie superficiali e strutture profonde (es. finestre tettoniche), e le implicazioni per la circolazione idrica sotterranea o per la stabilità dei versanti (Wellmann et al. 2022). Per i processi sismici, osservare in tempo reale come le onde elastiche vengano deviate, focalizzate o attenuate dalla topografia e dalla geologia introduce nozioni fondamentali sull’amplificazione locale del moto del suolo e sulla risposta sismica di sito, con immediate ricadute nella discussione sulla prevenzione e sul rischio sismico. Grazie alla combinazione con dati GIS reali – ad esempio importando le posizioni storiche degli epicentri o le faglie attive di una regione – la Sandbox AR permette di svolgere esercitazioni realistiche dove gli studenti testano l’impatto potenziale di eventi passati o ipotetici su morfologie attuali modellate nella vasca. L’integrazione di moduli AI (come reti neurali per la previsione di danni o instabilità) può inoltre fornire analisi predittive qualitative (es. identificazione automatica di zone a probabile amplificazione sismica o frana) basate sulle

caratteristiche modellate, stimolando approcci critici e consapevoli al tema della prevenzione e della pianificazione territoriale (Betti, Borghi, Virgini, 2025) (Figura 22).

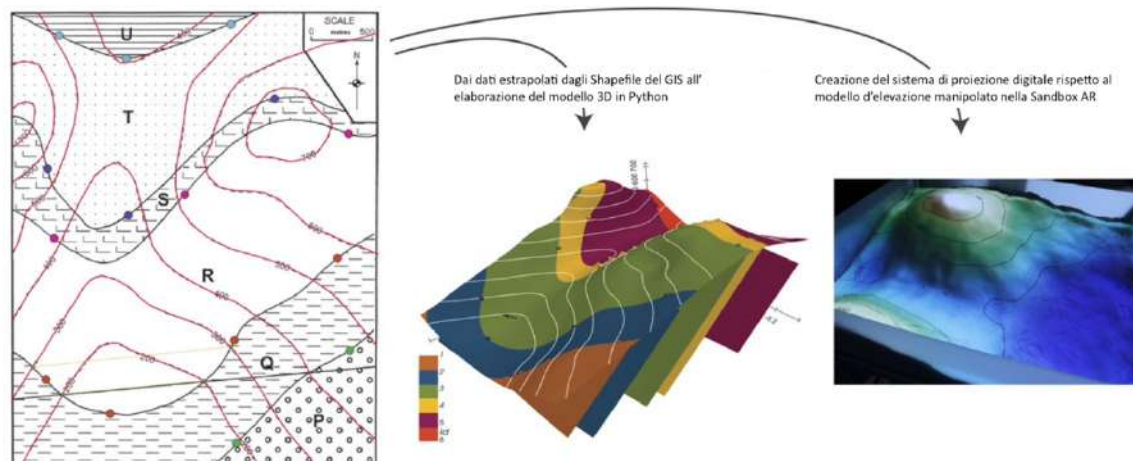


Figura 22. Sistema digitale per la simulazione geologica e sismica. Elaborazione dell'autore.

In un quadro didattico più ampio, queste simulazioni favoriscono un apprendimento esperienziale interdisciplinare (*STEM/STEAM*): si uniscono fisica (propagazione onde, elasticità), geologia strutturale (faglie, pieghe, stratigrafia), cartografia (proiezione dei dati, lettura di carte geologiche), e gestione del territorio (valutazione rischi, zonazione). La collaborazione tra gruppi multiutente – anche via *cyberspace educativo* in modalità remota – amplia ulteriormente le potenzialità formative: diverse classi possono progettare scenari geologici distinti ed esaminarne insieme le risposte sismiche, confrontando parametri, soluzioni morfogenetiche e strategie di mitigazione del rischio. L'estensione della Streambox AR alla rappresentazione dinamica dei fenomeni idrologici e sismici eleva lo strumento da semplice laboratorio topografico superficiale a piattaforma multifunzionale per l'esplorazione profonda dei processi terrestri. La combinazione sinergica tra manipolazione reale del modello fisico, calcolo numerico avanzato accessibile in tempo reale (grazie all'utilizzo delle librerie *GemPy* e *Devito*) e visualizzazione immersiva rafforza in modo determinante il legame tra teoria scientifica ed esperienza diretta dello studente, rendendo comprensibili concetti

astratti e promuovendo una cultura della sicurezza basata sulla conoscenza scientifica (Wellmann et al., 2022).

5.3 Integrazione dei dati e Osservazione Geografica Immersiva (OGI)

In continuità con l’approccio modulare, aperto e interconnesso, delineato nella prima parte del presente lavoro di ricerca, la Streambox AR è progettata per estendere le proprie capacità di acquisizione e rappresentazione ben oltre la sola topografia della sabbia, grazie all’integrazione dinamica di flussi di dati provenienti da una vasta gamma di sensori esterni, sia ambientali che geotecnici. Questa architettura espandibile consente di sperimentare realmente nei contesti scolastici forme di Osservazione Geografiche Immersive come ipotizzato nella prima parte di questo lavoro di ricerca: la realizzazione dei prodotti di ricerca durante questo percorso dottorale hanno portato alla creazione di un ecosistema tecnologico capace di fondere in tempo reale il rilievo fisico-digitale modellabile dagli studenti con misurazioni fisiche acquisibili sul campo, in altri laboratori o da reti di monitoraggio remoto (Betti, Borghi, Virgini, 2023).

Dal punto di vista tecnico, l’interfaccia *software* della Sandbox e della Streambox AR, rende possibile la connessione bidirezionale a flussi dati provenienti da dispositivi eterogenei tramite API (*Application Programming Interfaces*) e protocolli di comunicazione standard industriali e IoT (*Internet of Things*): in particolare, ancora in fase di sperimentazione per il trasferimento tramite Wi-Fi o HTTP, l’interazione tra osservazione reale e modellazione digitale in laboratorio avviene attraverso i database georeferenziati sottoforma di GIS. Sensori ambientali installati localmente, come stazioni meteorologiche scolastiche o sensori low-cost (basati su Arduino/ESP32), possono fornire parametri in tempo reale quali temperatura, umidità dell’aria e del suolo, velocità del vento, pressione atmosferica o intensità delle precipitazioni; parallelamente, sensori geotecnici installati sul territorio o su modelli fisici in

scala possono inviare valori relativi a deformazioni del terreno, pressione interstiziale, vibrazioni sismiche (accelerometri), livelli idrometrici o variazioni nella falda idrica (Wellmann et al., 2022). Questi dati vengono raggruppati in *shapefile* di GIS e integrati nel software della Sandbox AR, processati, normalizzati ed elaborati per generare *layer* tematici dinamici (sovrapposizioni grafiche informative) sovrapponibili alla proiezione topografica principale; tale proiezione è gestibile sia direttamente dal sistema, ma anche riconoscibile attraverso specifici QR Code inseribili nel modello (Figura 23).

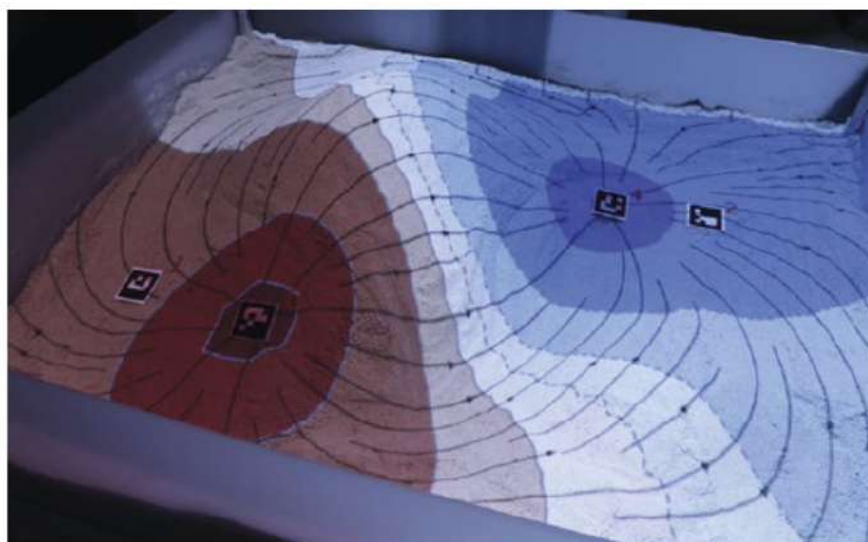


Figura 23. Risultato della proiezione di dati reali acquisiti sul campo all'interno dell'ecosistema della Sandbox AR attraverso riconoscimento di specifici QR Code. Elaborazione dell'autore.

La modalità di integrazione prevede una mappatura diretta e semantica tra il dato fisico rilevato dal sensore e la variabile grafica corrispondente nella visualizzazione immersiva; a esempio, un incremento reale della piovosità misurata da un pluviometro scolastico connesso può attivare automaticamente precipitazioni simulate nello scenario della Sandbox AR, calibrate sull'intensità effettiva registrata, permettendo di osservare gli effetti di un evento meteo reale su una morfologia modellata. Un accelerometro geotecnico o un sismografo posto su una scarpata locale o su una tavola vibrante che rileva micro-movimenti o scosse può far apparire indicatori cromatici di allerta o mappe di scuotimento (*shake maps*) nelle zone a

rischio del modello digitale proiettato. Ancora, le temperature superficiali acquisite da sensori IR o termocamere possono essere codificate come gradienti termici (*heatmap*) proiettati sulla morfologia per discutere di microclimi, isole di calore urbane o esposizione solare. Il sistema aggiorna dinamicamente la mesh digitale interna e le texture proiettate, aggiungendo o modificando gli overlay grafici (colori, icone, flussi) secondo le variazioni ricevute dai sensori. In contesti collaborativi avanzati via *cyberspace* educativo, queste informazioni in tempo reale possono essere condivise con altre classi o istituti collegati in rete: una scuola urbana e una rurale, dotate entrambe di Streambox, possono confrontare simultaneamente come identici parametri ambientali (es. una stessa perturbazione) influenzino scenari geomorfologici diversi, o come i dati raccolti dai rispettivi sensori locali differiscano, favorendo discussioni comparative sugli adattamenti territoriali e sul clima.

Dal punto di vista didattico, le potenzialità dell'OGI sono molteplici e trasformative. In primo luogo la contestualizzazione, per cui gli studenti vedono tradotti in simulazioni tangibili e comprensibili i dati raccolti nella loro comunità o scuola, legando indissolubilmente il lavoro laboratoriale astratto alle osservazioni reali del proprio ambiente di vita. In secondo luogo la comprensione processuale, poiché l'aggiornamento costante della visualizzazione in risposta ai dati dei sensori abitua gli studenti ad analizzare i fenomeni geografici come processi dinamici in continua evoluzione anziché come stati statici, sviluppando una profonda consapevolezza temporale delle dinamiche territoriali. Fondamentale è anche l'interdisciplinarietà: l'uso simultaneo e integrato di sensori ambientali, elettronica, informatica e modelli geotecnici lega concretamente geografia fisica, scienze ambientali, fisica, informatica (*coding* e *IoT*) e ingegneria, favorendo analogie e trasferimenti di conoscenze tra discipline diverse. Infine, lo sviluppo di competenze analitiche, in quanto correlare valori numerici misurati dai sensori a modifiche visive immediatamente osservabili sulla sabbia rafforza le abilità nell'interpretazione dei dati, nella comprensione delle unità di misura e nel loro impiego operativo per il monitoraggio ambientale. L'OGI diventa così un nodo fisico-digitale di raccolta, aggregazione e trasformazione dei dati che amplia radicalmente la funzione

originaria della Sandbox AR: non più soltanto un simulatore chiuso basato su forme manualmente modellate, ma una piattaforma aperta e permeabile, capace di reagire ad input distribuiti territorialmente e restituirli in forma immersiva, rendendo il dato scientifico invisibile (es. intensità della vibrazione) visibile e comprensibile anche a chi non possiede competenze tecniche avanzate. La localizzazione linguistica dei pannelli informativi proiettati ne garantisce inoltre un'ampia accessibilità culturale (Quintero et al., 2019). In prospettiva formativa, questa sinergia tra campo (sensori) e laboratorio (Sandbox e Streambox AR) aumenta significativamente la motivazione e l'efficacia dell'apprendimento esperienziale; prepara inoltre gli studenti a interagire con le logiche delle *Smart Cities* e delle reti di monitoraggio ambientale, e a partecipare attivamente a reti educative globali integrate dove i dati ambientali locali contribuiscono a modelli planetari collaborativi di *Citizen Science*.

5.4 Strumenti di calibrazione e validazione tecnica: miglioramento della precisione e affidabilità dei modelli

La calibrazione *hardware* in un sistema complesso come quello della Sandbox e della Streambox AR si configura come un processo multi-fase che mira a garantire la coerenza geometrica, ottica e funzionale tra le componenti di acquisizione sensoriale, gli apparati di proiezione e l'infrastruttura di elaborazione. Un primo ambito riguarda i moduli di cattura morfologica tridimensionale, come le telecamere LIDAR e i sistemi di proiezione, che richiedono una taratura accurata per assicurare la corretta mappatura delle coordinate spaziali acquisite rispetto alla scena fisica (Bärthele, Sauer, Wilkening, 2019). In particolare, si adottano procedure di allineamento che definiscono il piano base di riferimento della SbAR e della StAR e determinano i punti angolari estremi della superficie rilevata; queste misure geometriche servono a eliminare deformazioni prospettiche o errori dovuti a inclinazioni accidentali dei sensori. Per i sistemi ottici di proiezione, la calibrazione deve sincronizzare parametri intrinseci, lunghezza focale effettiva, distorsioni radiali e tangenziali della lente,

ed estrinseci, posizione e orientamento del proiettore nello spazio rispetto alla superficie interattiva (Roo et al., 2017). Queste grandezze vengono ottenute tramite strumenti *software* come i moduli di *camera calibration* dell'OpenCV per il mapping 2D-3D e mediante l'applicazione dell'algoritmo di Kabsch per allineamenti 3D-3D tra sagome digitali previste e punti *marker* reali (QR Code specifici). La verifica incrociata fra calibrazione delle ottiche e modelli geometrici proiettati consente di ottenere sovrapposizioni precise anche al variare delle condizioni operative o dopo manutenzioni straordinarie.

Un aspetto cruciale è l'allineamento tra nucleo di acquisizione e spazio di manipolazione; la proiezione aumentata richiede correzioni dinamiche qualora la topografia fisica venga modificata dall'utente; ciò avviene attraverso algoritmi che riconoscono variazioni nel *dataset* tridimensionale rispetto alla calibrazione iniziale e adattano in tempo reale la matrice di trasformazione del proiettore (Mutis, Antonenko, 2022). Questa funzione è particolarmente importante nelle sessioni didattiche in cui interventi manuali nella sabbia fisica devono avere risposta istantanea nel modello aumentato senza introdurre artefatti visivi. La stabilità fotometrica rientra anch'essa nei metodi di calibrazione: sensori dedicati alla luminanza ambientale permettono di regolare l'intensità del proiettore per mantenere leggibilità cromatica su superfici non uniformi o soggette a illuminazioni variabili (Lei et al., 2023). In contesti *multi-layer* complessi, ad esempio combinando *layer* topografico e idrologico, questa taratura assicura che ciascun *layer* mantenga fedeltà cromatica relativa e assoluta alle scale scientifiche adottate. Dal punto di vista mecatronico, è necessaria la calibrazione degli attuatori presenti nei simulatori integrati: nei simulatori del moto ondoso, basati su motori passo-passo accoppiati a trasduttori piezoelettrici, si misura e si compensa il rapporto tra input digitale previsto (ampiezza/frequenza) ed effetto fisico generato (Krawczyk et al., 2013). Questo si realizza mediante test comparativi in cui accelerometri campionano la lunghezza d'onda reale confrontandola con il segnale teorico; eventuali scostamenti vengono utilizzati per aggiornare le costanti di comando nei driver dei motori. L'architettura modulare della Streambox AR permette, infine, procedure iterative di ricalibrazione parziale

velocizzate. Per facilitare questi processi si adottano tool diagnostici integrati nell'interfaccia docente/tecnica capaci di guidare passo-passo l'operatore nelle misure necessarie riducendo margini d'errore umano. Tali strumenti salvano anche log storici delle tarature eseguite consentendo analisi retrospettive sulle derive prestazionali nel tempo. Questa documentazione strutturata contribuisce alla validazione tecnica complessiva della piattaforma prima dell'avvio delle simulazioni didattiche ad alta complessità.

Le procedure di validazione software nella piattaforma Streambox AR si articolano come un insieme di test sistematici condotti per assicurare che ogni componente applicativa, dal motore grafico 3D passando per i moduli AI+GIS predittivi e le interfacce multiutente, operi in conformità ai requisiti tecnici, funzionali e didattici stabiliti in fase progettuale. La validazione software rappresenta la controparte logica della calibrazione hardware, verificando che le routine sviluppate interpretino correttamente i dati acquisiti e li traducano senza errori nella proiezione aumentata: variazioni luminose ambientali e complessità poligonale crescente per verificare il mantenimento della fedeltà cromatica attraverso i sistemi automatici di *colour correction* (Mutis, Antonenko, 2022). Shader dedicati per fenomeni dinamici come flussi idrici o deformazioni sismiche vengono testati sia isolatamente sia integrati negli scenari *multilayer*; si misurano frame rate e tempi di risposta agli input utente per escludere cali prestazionali percepibili (Schwaiger et al., 2024).

Nella componente AI+GIS la validazione si concentra sulla precisione delle previsioni: reti neurali addestrate su dataset storici vengono alimentate con scenari simulati in cui le variabili climatiche e morfologiche sono controllate. L'output probabilistico atteso (a esempio rischio frana >75%) viene confrontato con il valore restituito dal sistema; se lo scarto supera soglie statisticamente rilevanti si procede alla ricalibrazione dei pesi della rete (Al-Somali, 2023). Questi test includono verosimiglianza spaziale delle mappe di rischio prodotte: l'overlay generato deve coincidere geometricamente con le zone individuate dai parametri input.

La validazione comprende inoltre prove sulle API configurabili lato docente: ogni comando inviato dall'interfaccia (attivazione/disattivazione *layer*, modifica parametri ambientali virtuali) deve riflettersi immediatamente nella scena aumentata mantenendo coerenza logica tra tutti gli elementi visivi attivi (Vauchez et al., 2023). Si verifica anche la gestione dello stato persistente, quando scenari complessi sono salvati e ricaricati. Viene inoltre certificata la conformità alle normative educative sulla protezione dei dati. Tutti i risultati delle procedure, infine, sono documentati in report strutturati contenenti metriche quantitative (latenza media tra input-output grafico; accuratezza previsione AI) e valutazioni qualitative da parte degli sviluppatori. Questa tracciabilità consente audit periodici e fornisce materiale analitico per evoluzioni future del sistema, preservando stabilità operativa ed efficacia didattica dell'ambiente Sandbox e Streambox AR.

6. Integrazione di modelli di Intelligenza Artificiale (AI) e GIS per l'analisi predittiva e la cartografia digitale. Un modulo per la ricerca.

6.1 Geographic Information System (GIS) e ruolo nella Didattica della Geografia

Il funzionamento di un Geographic Information System (GIS) si fonda sulla capacità di acquisire, gestire, analizzare e visualizzare dati geospaziali provenienti da fonti eterogenee, con l'obiettivo di rappresentare in forma digitale e interrogabile le caratteristiche del territorio e dei fenomeni che lo interessano. Un sistema GIS integra componenti hardware, software, dati geografici e procedure operative in un'architettura che consente la gestione simultanea di informazioni alfanumeriche e spaziali. La logica alla base è relazionale: ogni oggetto o fenomeno viene descritto da attributi memorizzati in tabelle strutturate e da una geometria associata che ne definisce posizione e forma. Le geometrie possono essere di tipo vettoriale, punti, linee o poligoni o *raster*, costituite da matrici di celle a cui sono attribuiti valori

numerici derivanti spesso da telerilevamento o rilievi UAV (Mutis, Antonenko, 2022). L'acquisizione dei dati avviene tramite input diretti da sensori terrestri (es. GPS differenziali), piattaforme aeree come droni dotati di camere multispettrali o LIDAR, reti IoT territoriali e banche dati cartografiche preesistenti. La compatibilità tra formati eterogenei è assicurata da standard aperti definiti dall'*Open Geospatial Consortium* (OGC), comprendenti protocolli come WMS (Web Map Service) e WFS (Web Feature Service) per la distribuzione remota di mappe e feature vettoriali. All'interno del GIS i dati grezzi sono sottoposti a processi di georeferenziazione: mediante trasformazioni geometriche si associano le coordinate acquisite a un sistema di riferimento coerente con EPSG riconosciuti a livello internazionale, consentendo così la sovrapposizione precisa con altri *layer* informativi e la fusione con dataset esterni senza perdita di accuratezza metrica. Il cuore operativo del GIS è costituito dal database spaziale che archivia le entità geografiche insieme ai relativi attributi. Sistemi relazionali come PostgreSQL/PostGIS permettono l'esecuzione di *query* complesse basate sia su condizioni tabellari sia su relazioni topologiche tra geometrie: ad esempio individuare tutte le aree a meno di 50 metri da un corso d'acqua o sovrapporre poligoni relativi a zone urbanizzate con griglie *raster* contenenti indici NDVI per valutare la copertura vegetativa (Migliaccio, Carrion, 2019). Il motore GIS interpreta queste richieste traducendole in operazioni spaziali ottimizzate come bufferizzazione, intersezione, unione o differenza tra *shapesfiles*. Una componente cruciale è l'aggiornamento dinamico dei *layer* tematici in risposta all'arrivo di nuovi dati rilevati sul campo: feed in tempo reale provenienti da UAV possono aggiornare una mappa delle frane attive modificando direttamente porzioni del *layer* poligonale corrispondente (Mutis, Antonenko, 2022). L'automazione di questi processi è ottenuta attraverso script o moduli ETL (*Extract Transform Load*) che filtrano, riconvertono ed inseriscono i file in formato standardizzato nel database geografico. In ottica predittiva, i modelli di Intelligenza Artificiale (AI) integrati nel GIS⁶⁵ utilizzano tali flussi per generare scenari

⁶⁵ Si fa riferimento agli strumenti di *GeoAI* (*Geospatial Artificial Intelligence*), come le librerie Python *Scikit-learn* o *TensorFlow* integrate in ambienti come ArcGIS Pro o QGIS tramite plugin, che permettono clustering, classificazione e regressione spaziale.

futuri basati su correlazioni statistiche storiche; i risultati vengono salvati come nuovi *layer* consultabili alla pari degli altri tematismi e collegati con attributi aggiuntivi che ne indicano probabilità ed eventuale margine d'errore (Al-Somali, 2023). Dal punto di vista della visualizzazione cartografica il GIS opera combinando simbologie predefinite e proiezioni cartografiche idonee allo scopo analitico. Sistemi SAR o AR possono ricevere direttamente dal GIS informazioni simboliche pronte per la proiezione fisica nella Sandbox AR: il *layer* vettoriale relativo alle aree allagabili può essere renderizzato in AR con riempimenti blu graduati secondo profondità stimata mantenendo coerenza cromatica grazie all'uso di profili colore calibrati (Mutis, Antonenko, 2022); inoltre il GIS gestisce tabelle di stile SLD/SE (*Styled Layer Descriptor / Symbology Encoding*) compatibili con gli standard OGC per assicurare uniformità grafica anche quando i layer sono distribuiti su più client remoti. La funzione analitica del GIS è rafforzata dalla capacità *multi-layer*: la sovrapposizione simultanea di più tematismi consente l'individuazione visiva ed algoritmica delle interrelazioni fra diversi fenomeni: incrociando, a esempio, un raster relativo alla pendenza del terreno con un vettoriale delle infrastrutture stradali si possono individuare tratti vulnerabili a frane; aggiungendo un *layer* meteorologico in tempo reale si valuta immediatamente se condizioni avverse coincidono con segmenti ad alto rischio (Pesaresi, 2017). Questi incroci consolidano l'approccio integrato richiesto dalle applicazioni immersive a fini educativi o gestionali. In scenari distribuiti multiutente il GIS funge da «*single source of truth*»: tutte le istanze client accedono allo stesso set aggiornato evitando discrepanze locali. La sincronizzazione è garantita dal server GIS centrale che pubblica servizi intercettabili dai dispositivi AR tramite API; nei contesti offline viene impiegata una replica locale parziale dei dataset critici alimentata tramite trasferimenti periodici per ridurre tempi di inattività.

L'uso della cartografia digitale in contesto didattico si articola in un insieme di pratiche che trasformano il GIS da strumento di analisi territoriale professionale a piattaforma formativa interattiva, capace di integrare dati geospaziali reali e simulati. La possibilità di acquisire ed elaborare informazioni multi-sorgente, come quelle provenienti da UAV dotati di camere

multispettrali o rilievi LIDAR, dati meteorologici in tempo reale o mappe topografiche preesistenti, offre agli studenti un ambiente in cui esplorare la correlazione tra dati numerici, rappresentazioni spaziali e fenomeni ambientali (Mutis, Antonenko, 2022). Nell'ambito educativo, la cartografia digitale permette una didattica situata: un docente può generare *layer* personalizzati che evidenziano zone interessate da specifici fenomeni, ad esempio bacini idrografici, aree a rischio frana o poligoni urbani, consentendo agli studenti di interrogarli direttamente tramite funzioni di query geospaziale. Le funzioni *multi-layer* del GIS si prestano a esercitazioni comparative: sovrapponendo tematismi differenti, uso del suolo, pendenza del terreno, copertura vegetativa, è possibile condurre analisi immediate sulla vulnerabilità ambientale o sull'idoneità territoriale per determinati interventi.

In ambito scolastico, questo approccio avvicina gli studenti alle competenze di *problem-solving* spaziale e li allena alla gestione dell'informazione complessa. L'uso degli standard OGC per servizi WMS/WFS consente inoltre al docente di importare mappe aggiornate da fonti esterne certificate direttamente nell'applicativo didattico AR/VR collegato alla sandbox fisica (Bärthele et al. 2023), rendendo l'esperienza immersiva coerente con il contesto reale. Uno degli aspetti più efficaci è la possibilità di simulare scenari "*what-if*" modificando parametri territoriali in tempo reale; ad esempio, un gruppo classe può intervenire virtualmente sulla morfologia digitale innalzando barriere lungo corsi d'acqua proiettati nella Sandbox AR. Immediatamente i modelli idrologici integrati nel GIS ricalcolano la nuova dinamica del flusso e l'output è visibile sia nella mappa digitale sia nella proiezione aumentata (Al-Somali, 2023). Questo legame tra azione manuale o parametrica e risposta grafica favorisce comprensione e verifica sperimentale.

La cartografia digitale supporta anche attività interdisciplinari: in una lezione che integri geografia fisica e scienze ambientali, gli studenti possono analizzare layer climatici storici associandoli a cambiamenti nella vegetazione o nei corsi d'acqua. I dati UAV-GIS caricati nel sistema diventano materiale per calcolare indicatori come NDVI (*Normalized Difference*

Vegetation Index) e confrontarli con situazioni attuali rilevate dai sensori locali della Sandbox (Mutis, Antonenko, 2022), sviluppando capacità valutative sullo stato ecologico. Dal punto di vista tecnico-didattico le API configurabili permettono al docente di strutturare esercitazioni progressive: prima si lavora su una mappa semplificata solo topografica; poi si aggiungono *layer* tematici uno alla volta per isolare l'effetto delle variabili introdotte. Questa gradualità riduce il carico cognitivo iniziale mantenendo però alta la complessità analitica nelle fasi avanzate (Bärthele et al. 2023). Le funzioni di interrogazione spaziale consentono agli studenti di selezionare un'area sulla mappa aumentata e ricevere valori aggregati (quota media, tipo suolo prevalente) memorizzati nel database geografico. L'integrazione con il rendering immersivo Sandbox AR assicura che i simboli cartografici siano correttamente visualizzati sul modello fisico, mantenendo proporzioni metriche e fedeltà cromatica grazie ai profili calibrati descritti in precedenza, offrendo così coerenza fra rappresentazione bidimensionale classica e interpretazione tridimensionale nello spazio aumentato. In prospettiva formativa superiore, la struttura del GIS consente progetti collaborativi multiutente dove più classi lavorano simultaneamente su un'unica base cartografica condivisa. Gli aggiornamenti effettuati da un gruppo vengono sincronizzati su tutte le postazioni coinvolte, favorendo la dimensione partecipativa. Questo tipo di collaborazione supporta lo sviluppo di competenze trasversali come coordinamento operativo e comunicazione scientifica basata su dati verificabili. Attraverso questi strumenti e metodologie la cartografia digitale diventa non solo supporto statico alla lezione ma parte integrante dell'attività laboratoriale immersiva: il *digital twin* del territorio gestito dal GIS dialoga continuamente con l'ambiente AR della Sandbox permettendo la sperimentazione controllata dei concetti teorici appresi.

6.2 Integrazione della Sandbox e della Stremabox AR con i software GIS open-source (QGIS)

La compatibilità tra sistemi AR e GIS *open-source* – nel caso di specie QGIS – nella piattaforma Streambox AR costituisce un requisito tecnico e metodologico imprescindibile per garantire che i dati geospaziali vengano acquisiti, trasformati e visualizzati in coerenza metrica e semantica rispetto alle rappresentazioni aumentate. Il concetto di compatibilità si sviluppa su più livelli, partendo dall'allineamento geometrico fra modelli tridimensionali generati dai sensori morfologici, telecamere LIDAR e le geometrie vettoriali o raster memorizzate nel database di QGIS (Bärthele, Sauer, Wilkening, 2019). Tale allineamento richiede processi di georeferenziazione accurati, basati su EPSG ufficiali e standard OGC per assicurare che coordinate acquisite sul campo corrispondano esattamente alle posizioni della mesh fisica proiettata. Il modulo middleware⁶⁶ svolge il ruolo di ponte tra flussi dati AR e GIS, traducendo formati nativi eterogenei (GeoJSON, shapefile, raster GeoTIFF) in strutture pienamente interoperabili con l'*engine* grafico utilizzato (*Unity o Unreal Engine*), mantenendo integrità numerica e topologica, evitando perdite di precisione (Mutis, Antonenko, 2022). In questo contesto la gestione della simbologia assume rilievo strategico: la compatibilità deve includere la capacità di trasferire *descriptor* SLD/SE dal GIS alla proiezione sulla sabbia, mantenendo codifiche cromatiche calibrate su standard come ITU-R BT.709 per garantire uniformità visiva. La componente temporale della compatibilità riguarda protocolli *low-latency* in grado di sincronizzare aggiornamenti morfologici e tematici tra AR e GIS entro soglie percettivamente impercettibili, anche in scenari multiutente complessi. Ogni modifica fisica o virtuale – rimodellamento manuale della SbAR e della StAR o aggiunta di nuovi layer tematici – è convertita in delta update dal middleware ed inviata simultaneamente ai client connessi. La replica sincrona o asincrona del geodatabase PostGIS

⁶⁶ Il *middleware* agisce come strato software intermedio che facilita la comunicazione e la gestione dei dati tra il sensore Kinect/LIDAR (input), il motore di simulazione fisica (processing) e il software GIS (database), garantendo la conversione dei formati in tempo reale.

consente al sistema distribuito di operare come “single source of truth”, evitando discrepanze locali tra differenti istanze della scena aumentata. Per garantire compatibilità semantica occorre un’integrazione diretta dei metadati ISO 19115/19139 che accompagnano ogni layer proveniente dal GIS; questi metadati mantengono traccia dell’origine, precisione e qualità dei dati fornendo al modulo AI+GIS elementi vitali per valutare l’affidabilità predittiva (Al-Somali, 2023). L’output dei modelli AI, ad esempio mappe di rischio geologico, è trasformato in layer aggiuntivi conformi agli stessi standard del GIS preesistente per poter essere interrogato insieme ad altri tematismi senza soluzione di continuità. Un aspetto delicato è il mantenimento della topologia spaziale durante la conversione AR/GIS: errori topologici (poligoni aperti, linee senza nodo terminale) generati da modifiche manuali devono essere rilevati dal middleware prima della pubblicazione verso il database geografico e corretti automaticamente ove possibile (Mutis, Antonenko, 2022). Solo così è possibile evitare incoerenze logiche nei calcoli GIS successivi come bufferizzazione o *intersect* tra *layer*. La gestione multi-layer nel SAR impone inoltre politiche di priorità visiva coordinate: il motore AR deve rispettare le gerarchie definite nel GIS per evitare conflitti grafici o sovrapposizioni errate fra tematismi diversi. Questo riguarda sia la leggibilità cromatica sia l’opacità dei layer secondari attivati mediante API lato docente. Nei contesti offline la compatibilità si ottiene attraverso repliche locali parziali dei dataset critici alimentate da trasferimenti batch cifrati end-to-end; le modifiche eseguite localmente sulla scena aumentata sono registrate con marcatura temporale conforme alle convenzioni IEEE 1588 PTP per consentire una fusione coerente con il database centrale alla riconnessione. Dal punto di vista operativo la compatibilità richiede tool diagnostici che possano confrontare lo stato della scena aumentata con il corrispondente *layer* GIS atteso; differenze oltre soglia possono avviare processi automatici di riallineamento sia delle geometrie sia degli attributi informativi associati. La progettazione modulare consente infine aggiornamenti incrementali: nuovi formati dati o servizi WMS/WFS possono essere integrati mediante driver aggiuntivi senza interruzione del servizio educativo immersivo. L’organizzazione dei flussi di lavoro integrati tra la piattaforma

Streambox AR e il software GIS richiede una sequenza coordinata di operazioni che vanno dalla fase di acquisizione dei dati geospaziali alla loro elaborazione e visualizzazione aumentata, mantenendo coerenza geometrica, temporale e semantica con i *layer* tematici originali (Mutis, Antonenko, 2022). In questo contesto, l'interoperabilità definita da standard OGC come WMS/WFS e schemi ISO 19115/19139 per i metadati permette di collegare senza discontinuità dataset vettoriali e raster alla scena immersiva, assicurando che attributi e geometrie siano preservati anche dopo trasformazioni complesse (Bärthele et al. 2023). Il ciclo operativo inizia con la raccolta dei dati morfologici tramite telecamere RGB-D o sensori a luce strutturata che producono nuvole di punti tridimensionali. Questi dataset sono immediatamente georeferenziati secondo sistemi EPSG ufficiali e sottoposti a normalizzazione mediante middleware GIS/UAV, garantendo compatibilità con le coordinate delle entità presenti nel database geografico (Bärthele, Sauer, Wilkening, 2019). Parallelamente, *feed* UAV-GIS ad alta risoluzione, corredati da *layer* multispettrali o modelli LIDAR, vengono importati nel sistema attraverso procedure di estrazione (ETL)⁶⁷ che includono filtraggio topologico e conversione nel formato interoperabile utilizzato per la proiezione sulla sabbia (Nex, Remondino, 2014). Una volta acquisiti e validati, i dati entrano nella fase di integrazione logica: il middleware associa alle geometrie gli attributi derivanti da tabelle GIS consentendo così query dirette dall'interfaccia. Questo passaggio è critico perché trasforma la mesh fisica aumentata in un contesto informativo interrogabile; a esempio, selezionando un poligono idrologico nel sistema in AR si possono visualizzare parametri come quota media o grado di saturazione del terreno (Wellmann et al. 2022). L'aggiornamento è bidirezionale: interventi manuali sulla morfologia fisica modificano automaticamente il

⁶⁷ Le procedure ETL (*Extract, Transform, Load*) non svolgono una mera funzione di trasferimento, ma operano una raffinazione qualitativa del dato spaziale: il filtraggio topologico rimuove artefatti e incongruenze geometriche (rumore, vegetazione non pertinente, errori di sovrapposizione), mentre la conversione assicura la conformità agli standard di interoperabilità (spesso basati su formati a griglia come GeoTIFF per i Modelli Digitali di Elevazione), garantendo che la proiezione sulla sabbia mantenga accuratezza metrica senza compromettere la fluidità del rendering in tempo reale.

layer GIS associato tramite protocolli *low-latency* con delta update ottimizzati, riflettendo in tempo reale le variazioni su tutti i client multiutente. La fase successiva prevede il *rendering* aumentato *multi-layer*. I tematismi GIS, topografia, idrologia, uso del suolo, sono mappati sulla superficie della SbAR rispettando gerarchie visive stabilite nel GIS per evitare conflitti cromatici o sovrapposizioni incoerenti (Bärthele et al. 2023). Questa rappresentazione integra codifiche cromatiche calibrate secondo profili BT.709 e *colour correction* automatica per garantire uniformità percettiva (Al-Somali, 2023). In presenza di overlay numerosi il sistema gestisce anche opacità variabili sui *layer* secondari limitando il carico cognitivo. All'interno del workflow si innesta l'analisi predittiva AI+GIS: reti neurali addestrate su dataset storici vengono alimentate dai valori attuali provenienti dai sensori; l'output, mappe di probabilità di rischio, viene registrato come nuovo *layer* nel database geografico e proiettato nella scena AR in overlay perfettamente co-registrato (Al-Somali, 2023). La gestione integrata assicura che le aree evidenziate dai modelli previsionali siano sincronizzate tra AR e GIS anche quando l'attivazione avviene da postazioni diverse. Per mantenere robustezza tecnica ed efficienza operativa nei flussi di lavoro integrati si adottano strategie differenziate rispetto alla latenza: nei contesti online si privilegiano protocolli *low-latency* con compressione selettiva degli asset; nei contesti offline i pacchetti evento vengono accumulati localmente in modalità batch data transfer cifrata end-to-end fino alla sincronizzazione successiva. Questo approccio tutela l'integrità della sequenza cronologica delle modifiche e ne garantisce la fusione coerente con lo stato centrale del GIS. Un elemento qualificante del *workflow* integrato è l'uso di controlli automatici d'allineamento: algoritmi residenti confrontano costantemente geometrie proiettate in AR con quelle memorizzate nel geodatabase; differenze oltre soglia attivano *routines* di riallineamento proporzionale sui singoli client o sul master server. Questo meccanismo evita drift spaziali cumulativi e protegge la validità scientifica delle analisi didattiche condotte sulla piattaforma. La chiusura del ciclo operativo avviene con il salvataggio strutturato delle sessioni: ogni scena aumentata viene esportata come progetto GIS completo di layer attivi, stili personalizzati e metadati

associati. Questa esportazione facilita sia la replica delle esercitazioni sia l'archiviazione per audit tecnici o revisione didattica futura. La modularità dell'architettura consente infine l'introduzione progressiva di nuove sorgenti dati o modelli algoritmici senza interruzione del servizio educativo immersivo grazie all'inserimento controllato nei flussi già consolidati (Adel, 202).

6.3 L'intelligenza Artificiale (AI) per l'analisi geografica: alcuni test condotti su modelli predittivi e interpretativi per la ricerca

L'applicazione di architetture di Machine Learning (ML) per l'elaborazione geografica richiede un'attenzione specifica alla natura multimodale e spazialmente correlata dei dati. Nel contesto di una Sandbox e di una Streambox AR, la progettazione deve considerare sia le componenti hardware di acquisizione dati sia l'infrastruttura software in grado di gestire processi complessi di analisi in tempo reale. Una infrastruttura distribuita con capacità di calcolo anche ai margini della rete può garantire tempi di latenza ridotti e permettere l'addestramento o l'aggiornamento dinamico dei modelli senza interrompere il funzionamento del sistema (Timokhin, Mikhaylyuk, 2023). Questo tipo di approccio diventa essenziale quando si integrano modelli predittivi legati a fenomeni territoriali, come variazioni idrologiche o scenari meteorologici, nei quali la tempestività dell'informazione incide direttamente sull'efficacia delle simulazioni. Nell'ambito delle architetture di Machine Learning (ML) per il dominio scientifico della Geografia, le reti neurali rappresentano una scelta particolarmente adatta per compiti di riconoscimento e classificazione in immagini satellitari o fotografiche georiferite. L'impiego di tecniche di pre-processamento, comprese diverse modalità di segmentazione, può modificare sensibilmente le performance dei modelli; l'adozione, a esempio, di segmentazioni direzionali invece che uniformi può migliorare la capacità del modello nel rilevare dettagli territoriali specifici quali rive fluviali o strutture geomorfologiche sottili (Restrepo et al. 2019). L'integrazione tra ambienti GIS e modelli ML

implica anche la capacità del sistema di fare interoperare formati eterogenei e sorgenti dati multiple. Schemi architetturali che incorporano componenti per «l'*Extraction, Transformation and Load* (ETL) risultano utili per normalizzare i dati provenienti da sensori *in situ*, droni o sorgenti open-data» (Timokhin, Mikhaylyuk, 2023). Tali pipeline consentono poi agli algoritmi ML di operare su insiemi coerenti con componenti temporali e spaziali sincronizzate, facilitando così elaborazioni predittive consistenti. Un ulteriore elemento strategico è rappresentato dalla possibilità di estendere le funzioni dell'infrastruttura ML attraverso strumenti AR che arricchiscano la percezione dell'utente con effetti visivi sovrapposti alle mappe digitali. Tecnologie immersive possono infatti fornire feedback immediato sugli output dei modelli, permettendo un'interazione più intuitiva tra analisti (anche con competenze limitate) e il sistema informativo territoriale (Wagner, Alharthi, 2023). Questo aspetto appare rilevante soprattutto in contesti educativi e formativi nei quali la visualizzazione aumenta il coinvolgimento e facilita la comprensione.

Le architetture ML moderne possono inoltre beneficiare dell'inserimento di elementi cognitivi simulati tramite Large Language Models (LLM) opportunamente collegati ai dataset geografici. Sebbene gran parte della loro applicazione si concentri sul linguaggio scritto, vi è la possibilità di costruire interfacce multimodali in cui descrizioni testuali contestuali accompagnino elaborazioni geospaziali complesse; è possibile, a esempio, generare automaticamente descrizioni qualitative delle condizioni meteorologiche simulate o indicazioni sui rischi idrogeologici ipotizzati da un modello predittivo. Per particolari applicazioni educative basate su scenari sintetici è interessante anche il richiamo a *framework* pensati per ambienti simulati *textual-based*, come quelli impiegati nel campo dei giochi interattivi (Côté et al., 2018). Sebbene nativi per scopi narrativi piuttosto che geografici, alcuni principi adottati in tali *framework* (es. nella gestione degli stati o nella modellazione sequenziale delle azioni) possono essere trasferiti alla modellizzazione interattiva dei processi territoriali nelle Sandbox AR. La connessione tra modelli ML e sistemi GIS può essere resa più efficiente grazie all'uso combinato di intelligenza artificiale centralizzata e learning distribuito.

Questa impostazione può ampliare il numero e la diversità delle fonti informative alimentando i sistemi previsionali senza compromettere vincoli normativi. Sul piano applicativo nelle simulazioni AR educational avanzate, un'architettura ML integrata dovrebbe prevedere:

- la componente sensoriale integrata con sistemi GIS per acquisire dati topografici 3D;
- reti neurali dedicate al riconoscimento automatico delle forme del paesaggio;
- algoritmi predittivi addestrabili incrementando progressivamente lo storico osservativo;
- un motore grafico in grado di fondere output numerici e mappe realistiche interattive.

Questa struttura modulare permette una migliore manutenzione e uno sviluppo incrementale delle funzionalità. Infine va sottolineato che l'adozione diffusa ed efficace delle architetture ML nel contesto geografico può richiedere interventi formativi sugli operatori e sessioni progressive per identificare strategie didattiche adeguate all'ambiente AR interattivo (Thananthong, Mangkhang, 2023).

Attraverso i nuovi sistemi di Intelligenza Artificiale basati su LLM, si possono condurre operazioni di analisi geografica che si concentrano sull'estrazione, interpretazione e strutturazione delle informazioni testuali associate a fenomeni spaziali, utilizzando strumenti computazionali e metodologie di ML capaci di elaborare grandi moli di descrizioni geografiche, annotazioni e metadati. In un contesto di sistemi GIS integrati con modelli predittivi di intelligenza artificiale, la componente linguistica non si limita alla traduzione automatica o alla classificazione semantica; essa affronta complessità legate a polisemia, variabilità sintattica e ambiguità contestuale tipiche dei dataset territoriali generati da fonti eterogenee, come osservazioni meteorologiche scritte in linguaggi tecnici o dati idrologici accompagnati

da descrizioni qualitative⁶⁸ (Buonora, 2024; Mai et al., 2022; Bordogna, Psaila, 2008). Il testo geografico può contenere riferimenti culturali e colloquiali che sfuggono agli algoritmi di analisi puramente statistica, rendendo necessario l'impiego di modelli linguistici allenati su corpora specifici del dominio. Integrare la capacità interpretativa dei LLM con il processing spaziale comporta la necessità di definire pipeline che traducano automaticamente le espressioni linguistiche in attributi quantitativi utilizzabili dalle funzioni GIS; a esempio, la menzione “vicino al margine occidentale del bacino” deve essere trasformata in coordinate geografiche compatibili con i *layer* cartografici esistenti. Operazioni simili si basano su *pattern recognition* linguistico combinato con librerie geospaziali che riconoscono toponimi e ne calcolano la posizione sul piano cartesiano del sistema GIS (Wagner, Alharthi, 2023). Questa fase richiede un modello capace di gestire l'errore derivante da descrizioni incomplete o contraddittorie: frasi come “poco oltre il fiume principale” possono essere interpretate solo se vi è corrispondenza fra entità nominali (“fiume principale”) e database geospaziali aggiornati. Una parte critica riguarda il filtraggio semantico per distinguere tra dati geografici utili e contenuto testuale irrilevante o potenzialmente fuorviante. Gli algoritmi devono apprendere criteri di selezione basati tanto sul contesto spaziale quanto sulla coerenza interna del testo. Nei casi più complessi, testi provenienti da report locali possono raccontare eventi meteorologici eccezionali senza specificare coordinate precise ma fornendo indicazioni qualitative; qui entra in gioco l'uso avanzato della simulazione AR per visualizzare le ipotesi posizionali generate dal modello ML attraverso un'interfaccia interattiva, con una presentazione dinamica delle possibili aree coinvolte (Soelistiono, Wahidin, 2023). Ciò consente una rappresentazione tridimensionale arricchita da metafore visive che

⁶⁸ La gestione di tale eterogeneità semantica richiede il superamento della logica binaria tipica dei database relazionali tradizionali (SQL), incapaci di processare l'intrinseca vaghezza del linguaggio naturale (“pioggia intensa”, “rischio moderato”). Per mitigare il disallineamento tra la rigidità geometrica del dato GIS e la fluidità delle descrizioni qualitative, la metodologia adotta approcci di *Soft Computing* e logica *Fuzzy*, supportati da ontologie di dominio. Tali strumenti permettono di modellare matematicamente l'incertezza linguistica, trasformando termini vaghi in vincoli spaziali computabili e garantendo l'interoperabilità semantica tra osservazioni tecniche strutturate e reportistica descrittiva non strutturata.

colmano gap informativi. L'adozione di agenti computazionali capaci di interagire iterativamente con il flusso dati – analogamente a quanto avviene nei motori di gioco interattivi – permette un affinamento progressivo delle inferenze linguistiche. La conversione strutturata delle descrizioni in formati operativi sfrutta un ciclo di *parsing-simbolizzazione-assegnazione* che ricorda procedure usate in ambienti come TextWorld, dove lo stato del sistema evolve sulla base delle interazioni testuali dell'agente (Côté et al., 2018). Questa similitudine mette in evidenza come un approccio ibrido tra elaborazione linguistica naturale e modellizzazione ambientale possa migliorare l'efficienza nell'individuare correlazioni spazio-temporali nei testi geografici. Un ulteriore aspetto riguarda l'applicabilità dei metodi linguistici nella rappresentazione multi-scala: citazioni testuali presenti in descrizioni regionali devono essere riadattate quando il focus passa al micro-livello territoriale. Se un documento riporta “l'area agricola è soggetta ad alluvioni annuali”, combinare tale informazione con i database idrologici permette la costruzione automatica di mappe predittive visive mediante AR arricchita da indicatori cromatici e simbolici. Per evitare errori semantici dovuti alle variazioni lessicali tra le lingue o dialetti locali, si può implementare un modulo linguistico capace di effettuare normalizzazione terminologica prima della fase cartografica (Arymbekov et al., 2024).

PARTE TERZA: SPERIMENTAZIONE SUL CAMPO, ANALISI DEI RISULTATI E IMPLICAZIONI DIDATTICHE

7. Protocolli di sperimentazione e valutazione dell'efficacia didattica

7.1 Disegno sperimentale e valutazione dell'efficacia didattica

La validazione delle geotecnologie sviluppate e analizzate nelle parti precedenti di questo lavoro – in particolare la Sandbox AR, la Streambox AR e i sistemi di GeoAI – ha richiesto l'adozione di un rigoroso disegno sperimentale basato su un approccio *mixed methods*⁶⁹. Tale scelta metodologica, ampiamente consolidata nella ricerca educativa e geografica (Creswell, 2014), risponde alla necessità di catturare la complessità dei fenomeni di apprendimento che non possono essere ridotti a sole metriche numeriche, né affidati esclusivamente a narrazioni soggettive. La terza parte del lavoro si concentra sulla verifica empirica dell'efficacia didattica degli ecosistemi sviluppati, attraverso una sperimentazione sul campo e in contesti reali di insegnamento-apprendimento che ha coinvolto i due ordini di scuola secondaria e docenti provenienti dal mondo della scuola più in generale. L'obiettivo primario è dimostrare come l'approccio manipolativo e immersivo possa superare le difficoltà concettuali e spaziali tradizionalmente associate all'apprendimento della Geografia – rilevate nel *Corpus degli apprendimenti geografici complessi* elaborato nella prima parte della tesi –, includendo anche gli studenti con Bisogni Educativi Speciali (BES). La metodologia adottata combina l'analisi quantitativa dei risultati di apprendimento con l'interpretazione

⁶⁹ Il paradigma di ricerca *Mixed Methods* si fonda sull'integrazione sistematica di dati quantitativi (es. questionari strutturati, log di sistema, metriche di performance) e qualitativi (es. interviste, focus group, osservazione partecipante) all'interno di un singolo studio o programma di indagine. L'assunto epistemologico alla base di tale approccio è che la combinazione dei due metodi fornisca una comprensione del problema di ricerca più completa rispetto a quella offerta dai singoli approcci isolati. In ambito educativo e tecnologico, l'utilizzo di una strategia *Mixed Methods* (spesso di tipo "Convergent Parallel" o "Explanatory Sequential") è cruciale per operare la triangolazione dei dati: i risultati numerici misurano l'ampiezza e la frequenza dei fenomeni (es. l'usabilità della Sandbox AR), mentre i dati qualitativi ne esplorano la profondità e il significato dal punto di vista dell'utente, garantendo così una maggiore validità ecologica ai risultati sperimentali (Creswell, J. W., Plano Clark, V. L. 2017 ; Cohen et al. 2018; Teddlie, Tashakkori, 2009).

qualitativa delle percezioni e delle dinamiche di interazione rilevate. Tale approccio si è reso necessario per cogliere non solo l'entità del miglioramento nell'apprendimento, ma anche le dinamiche sottostanti che lo hanno generato, in linea con le più recenti tendenze della ricerca didattica (Creswell, 2014).

L'integrazione dei due filoni di indagine permette di rispondere a interrogativi di ricerca complementari:

1. Dimensione Quantitativa (QUAN). In che misura le competenze digitali pregresse influenzano l'adozione della Sandbox AR? Qual è la percezione statistica dell'efficacia dello strumento rispetto alle metodologie tradizionali? Esiste una correlazione tra il ruolo professionale (docente vs studente) e la valutazione delle potenzialità didattiche?
2. Dimensione Qualitativa (QUAL). Quali sono i meccanismi cognitivi specifici attivati dalla manipolazione tangibile della sabbia? In che modo la Sandbox AR e la Streambox AR favoriscono l'inclusione di soggetti con Bisogni Educativi Speciali (BES)? Quali sono le resistenze culturali o logistiche che emergono "tra le righe" delle narrazioni dei docenti?

I dati analizzati provengono da una vasta campagna di rilevazione condotta tra il 2023 e il 2025, che ha coinvolto un campione stratificato di attori del sistema educativo, documentati nel dataset delle risposte al questionario di validazione.

La metodologia *mixed methods* consente di triangolare al meglio questi dati, ovvero di verificare la coerenza tra le misurazioni numeriche e le osservazioni qualitative, aumentando la validità interna della ricerca. La componente quantitativa ha previsto un disegno pre-test/post-test con gruppo di controllo (GC) e gruppo sperimentale (GS). Il pre-test (T0) è stato somministrato a inizio anno scolastico per accertare il livello di partenza omogeneo dei gruppi rispetto al *Corpus degli apprendimenti geografici complessi*. Il post-test (T1) ha

misurato l'apprendimento dopo l'intervento didattico differenziato della durata di sei/quattro settimane; questo intervallo temporale è stato scelto per permettere una consolidazione sufficiente dei contenuti geografici, evitando al contempo il confondimento dovuto a fattori stagionali o a variazioni nel *curriculum* scolastico.

La componente qualitativa ha incluso tre dimensioni di analisi complementari. Innanzitutto, l'analisi tematica dei questionari: le risposte aperte del questionario somministrato a docenti, ricercatori e operatori del settore educativo (campione totale 120 persone) hanno fornito un quadro prezioso sulle percezioni di potenzialità (interattività, visualizzazione 3D, motivazione, inclusione) e criticità (costi, formazione docenti, limitazioni logistiche) della Sandbox AR e dei suoi upgrade.

In secondo luogo, una parte importante dell'acquisizione dei dati ha riguardato l'Osservazione Partecipante Strutturata: la registrazione sistematica delle interazioni degli studenti (in particolare i BES) con la Sandbox AR e la Streambox AR, focalizzandosi sulle competenze spaziali, relazionali e sulla qualità dell'*engagement*.

In terzo luogo, l'Analisi dei Diari di Bordo: i docenti hanno compilato diari strutturati per documentare le difficoltà riscontrate, i momenti di *breakthrough* cognitivo e le dinamiche di gruppo durante le lezioni⁷⁰.

Un elemento di innovazione metodologica risiede nell'applicazione di tecniche di GeoAI per l'analisi del dato qualitativo e spaziale; specificamente, l'analisi delle risposte aperte è stata supportata da un modello di *Natural Language Processing* (NLP) per l'identificazione

⁷⁰ Il diario di bordo si configura come uno strumento narrativo di monitoraggio *in itinere*, fondamentale nelle metodologie di ricerca qualitativa e *Action Research*. A differenza delle griglie di osservazione pre-codificate, il diario offre uno spazio di documentazione flessibile (Schön, 1983), permettendo al docente-ricercatore di registrare eventi imprevisti, dinamiche relazionali sottili e processi cognitivi non lineari. La sua funzione è duplice: documentale, per fissare la "memoria" dell'esperienza didattica (inclusi gli *insight* o "breakthrough" degli studenti altrimenti volatili), e metacognitiva, poiché obbliga l'osservatore a una rielaborazione riflessiva dell'azione didattica, fornendo dati contestuali indispensabili per la triangolazione con le rilevazioni quantitative.

e la categorizzazione automatica dei temi ricorrenti, permettendo una quantificazione più oggettiva delle percezioni. Inoltre, l'affiliazione geografica dei docenti rispondenti al questionario è stata georeferenziata e sottoposta ad analisi di *spatial clustering* (GeoAI) per verificare se la percezione di efficacia o le criticità fossero correlate alla vicinanza a centri di ricerca o a contesti socio-economici specifici; sebbene l'analisi non abbia rivelato *cluster* significativi per la percezione di efficacia, ha confermato che le criticità legate ai costi e alla logistica erano più accentuate nei contesti rurali o periferici, evidenziando una potenziale disparità geografica nell'accesso alle geotecnologie avanzate.

L'integrazione dei dati ha permesso di stabilire che, sebbene la maggior parte dei rispondenti al questionario (71%) non utilizzi regolarmente geotecnologie nella didattica, la percezione dell'efficacia della Sandbox AR è elevata (48.6% la ritiene efficace o molto efficace), suggerendo un forte potenziale non ancora pienamente sfruttato nella pratica didattica. Questo dato è particolarmente significativo perché indica che la resistenza all'adozione delle geotecnologie non è dovuta a una percezione di scarsa efficacia, bensì a barriere organizzative e di formazione.

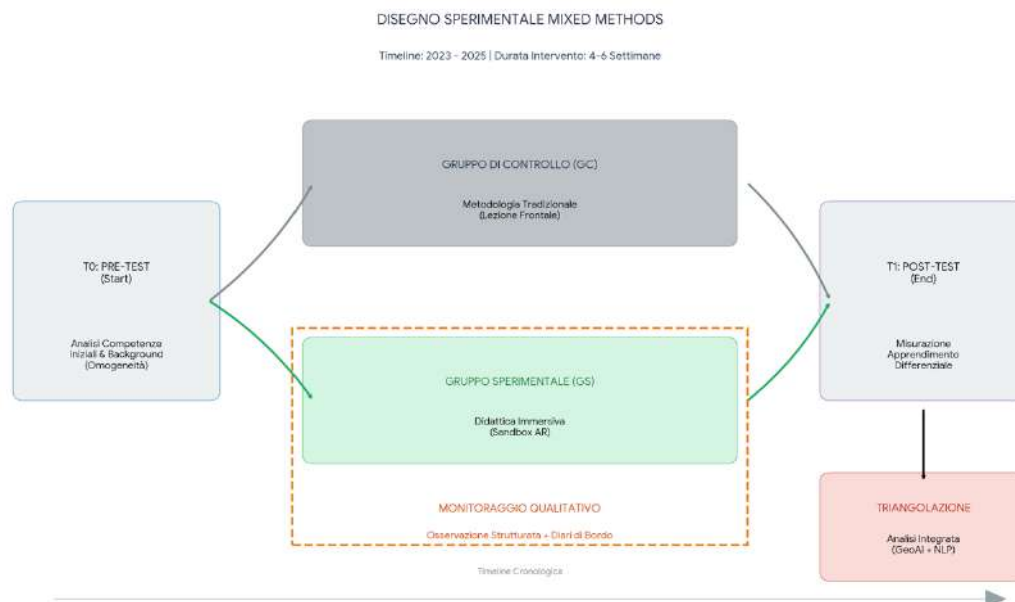


Figura 24. Diagramma della sperimentazione 2023-2025. Elaborazione dell'autore su dati in Appendice – Tabella 5.

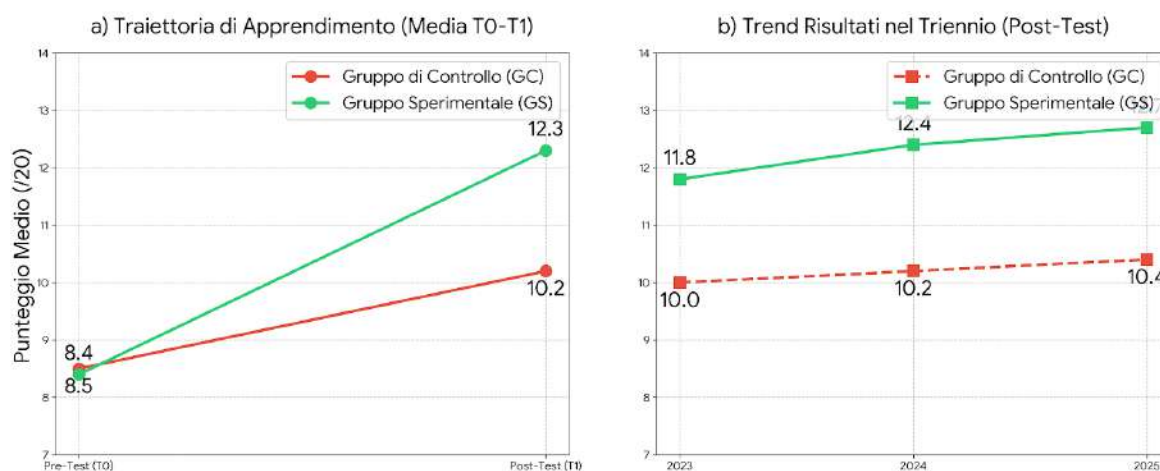


Figura 25. Trend dei risultati di apprendimento nel triennio 2023-2025.⁷¹ Elaborazione dell'autore su dati in Appendice – Tabella 6.

⁷¹ Il grafico illustra l'evoluzione delle performance medie nei due gruppi osservati. Nel Pannello A è evidente come, a fronte di una situazione di sostanziale parità in ingresso (T0), dove entrambi i gruppi si collocavano in area di insufficienza (media~8.5/20), l'intervento didattico abbia prodotto due esiti divergenti. Mentre il Gruppo di Controllo (linea rossa) mostra una curva di crescita piatta, raggiungendo a fatica la soglia della sufficienza (10.2/20), il Gruppo Sperimentale (linea verde) evidenzia un'impennata significativa (*slope*

7.2. Campioni di riferimento, raccolta dati e protocolli di intervento: Primaria e Secondaria di Primo e Secondo grado

La sperimentazione ha coinvolto studenti, docenti ed educatori in campo scolastico, con diversi gradi di conoscenza e competenza geografica e informatica: un campione totale di N=120 studenti, suddivisi in due gruppi principali e un sottogruppo di interesse specifico; un gruppo di 76 persone divisi tra docenti strutturati, in formazione e personale scolastico educativo. La selezione del campione è stata effettuata attraverso un campionamento stratificato per garantire la rappresentatività rispetto ai livelli scolastici e alle caratteristiche sociodemografiche del gruppo di riferimento. I partecipanti provenivano da quattro istituti scolastici situati nella regione Marche, in Italia, selezionati per la loro disponibilità a partecipare alla sperimentazione, per la loro eterogeneità in termini di contesto socioeconomico e per l'inserimento del sottoscritto all'interno del consiglio di classe di una di queste scuole.

Il campione di riferimento si presenta eterogeneo, coprendo l'intero spettro della filiera formativa. Si identificano tre macro-cluster principali:

- Docenti in Servizio (Scuola Primaria e Secondaria). Costituiscono il nucleo centrale della sperimentazione “sul campo”. Le risposte provengono da istituti comprensivi e scuole superiori (es. Liceo delle Scienze Umane Stella Maris di Civitanova Marche, Istituto Comprensivo Pinocchio-Montesicuro di Osimo, IIS Matteo Ricci di Macerata, Scuola Elementare e Media di San Marino), garantendo una rappresentatività dei diversi ordini scolastici. La fascia d'età prevalente in questo cluster è “45 +”, un

positiva), attestandosi su valori di piena competenza (12.3/20). Il Pannello B contestualizza questo dato nel triennio 2023-2025, confermando la solidità del protocollo sperimentale: si nota infatti un trend di miglioramento costante per il Gruppo Sperimentale, correlabile alla progressiva ottimizzazione degli strumenti *Sandbox AR* e *Streambox AR* e alla maggiore confidenza acquisita dai docenti. L'ampiezza della forbice tra le due curve al termine del percorso (Gap = +2.1 punti) è la rappresentazione visiva dell'Effect Size ($d \approx 0.8$) discusso nell'analisi statistica.

dato che riflette l'anzianità media del corpo docente italiano e che pone interrogativi specifici sul *digital divide* generazionale.

- **Studenti Scuola Secondaria, Universitari e Tirocinanti.** Un gruppo nutrito di rispondenti appartiene alle fasce 12-15 anni (dalle Scienze Umane) e 18-25 anni, quest'ultimi prevalentemente affiliati all'Università di Macerata (Scienze della Formazione Primaria). In particolare questo ultimo cluster rappresenta la futura generazione di insegnanti; la loro percezione è fondamentale per comprendere la sostenibilità futura dell'innovazione.
- **Esperti e Stakeholder Esterni.** Figure professionali ibride, come ricercatori universitari o liberi professionisti nel campo dell'autismo (es. "Libera professionista collaboratrice omphalos autismo"), che offrono uno sguardo specializzato sulle applicazioni terapeutiche e inclusive della tecnologia.

L'analisi dei livelli di competenza informatica autodichiarati, basati sul *framework* europeo *DigComp*, rivela uno scenario complesso che smentisce alcune narrazioni comuni sui "nativi digitali" e sui docenti "resistenti", come emerge dalla Tabella 7.

Tabella 7. Dati sulle competenze digitali degli utenti della sperimentazione. Elaborazione a partire da dati raccolti dall'autore.

Cluster Demografico	Livello <i>DigComp</i> Prevalente	Interpretazione dei Dati
Studenti (12-5anni; 18-25 anni)	Base (Liv. 2) - Intermedio (Liv. 3)	Nonostante la giovane età, la competenza digitale è spesso limitata all'uso "consumer" (smartphone, social). Molti dichiarano "Poca dimestichezza" con software professionali, evidenziando una lacuna nella formazione digitale specialistica.
Docenti (36-45 anni)	Intermedio (Liv. 3-4)	Si osserva una buona autonomia su compiti definiti, spesso supportata da certificazioni (ECDL, LIM). È il gruppo più "pronto" all'adozione, con una discreta familiarità con strumenti d'aula.
Docenti Senior (45 +)	Vario (da Liv. 2 a Liv. 4)	Forte polarizzazione: si trovano sia docenti con competenze avanzate e passione per l'innovazione, sia profili con competenze base limitate alla videoscrittura.

L'indagine sulle esperienze pregresse mostra una gerarchia netta nell'uso delle geotecnologie. Alla domanda "Quali geotecnologie conosci o ti è capitato di vedere?", la risposta dominante è quasi esclusivamente Google Earth / Maps. Strumenti più avanzati come i GIS (QGIS, ArcGIS) sono citati raramente e quasi esclusivamente da profili tecnici o accademici. Questa "monocultura" di Google Earth ha implicazioni profonde sulla validazione della Sandbox AR. Da un lato, fornisce un terreno comune: tutti sanno cosa significa navigare virtualmente il globo. Dall'altro, consolida un paradigma di "osservazione passiva" (guardare il mondo dallo schermo) che la Sandbox AR intende scardinare a favore di una "manipolazione attiva". La sfida della sperimentazione è stata quindi quella di spostare l'utente da una postura di spettatore (tipica del Geo-browser) a quella di attore/creatore (tipica della Sandbox).

Andando invece nello specifico delle analisi del gruppo degli studenti, gli interventi sperimentali sono riassunti come segue:

- Gruppo di Controllo (GC): N=60 studenti, provenienti da classi omogenee per età e livello scolastico. La composizione era: 30 studenti della Secondaria di Primo Grado (classi terze, età media 13.8 anni) e 30 studenti del Primo Biennio della Secondaria di Secondo Grado (classi prime, età media 14.9 anni). La distribuzione di genere era equilibrata (52% femmine, 48% maschi).
- Gruppo Sperimentale (GS): N=60 studenti, con la stessa distribuzione scolastica del GC (30 Secondaria I Grado, 30 Secondaria II Grado) e caratteristiche sociodemografiche comparabili. La distribuzione di genere era simile (46% femmine, 54% maschi).
- Sottogruppo Sperimentale BES (GS-BES): Circa N=10 studenti all'interno del GS, identificati con Bisogni Educativi Speciali secondo la normativa italiana (Legge 170/2010 e successive integrazioni). La composizione era: 4 studenti con Disturbi Specifici dell'Apprendimento (DSA, principalmente dislessia e discalculia), 6 studenti con disturbo dello spettro autistico. Questi studenti erano distribuiti equamente tra i due livelli scolastici.

I protocolli di intervento sono stati strutturati in modo rigoroso per garantire la massima coerenza e comparabilità; nella Tabella 8 sottostante sono riassunte le tappe principali

Tabella 8. Tabella riassuntiva del protocollo analitico utilizzato per le rilevazioni sugli utilizzi delle geotecnologie. Elaborazione dell'autore.

Aspetto	Gruppo di Controllo (GC)	Gruppo Sperimentale (GS)
Durata Intervento	4 settimane (12 ore totali)	4 settimane (12 ore totali)
Frequenza	3 ore/settimana	3 ore/settimana
Modalità Didattica	Lezione frontale e studio individuale	Didattica laboratoriale e manipolativa
Strumenti Utilizzati	Libri di testo, mappe bidimensionali, lavagna tradizionale, video-proiettore	Sandbox AR, StreamBox AR, GeoAI (per analisi dati), GIS semplificato (QGIS), software di simulazione 3D
Focus Pedagogico	Approccio tradizionale, prevalentemente teorico e mnemonico	Approccio esperienziale, visualizzazione 3D, interattività, problem-solving, Osservazione Geografica Immersiva
Ruolo dell'Insegnante	Trasmettitore di conoscenza	Facilitatore e osservatore di processi di apprendimento
Ruolo dello Studente	Fruitore passivo di informazioni	Geografo attivo, manipolatore e osservatore del paesaggio

Il protocollo del GC ha seguito il *curriculum* tradizionale, con lezioni frontali di 50 minuti ciascuna, seguite da esercizi individuali su mappe e questionari. I docenti hanno utilizzato il libro di testo adottato dalla scuola e hanno integrato le lezioni con videoproiezioni di presentazioni Power Point e documentari geografici standard; l'enfasi è stata posta sulla memorizzazione dei concetti e sulla decodifica delle mappe bidimensionali.

Il protocollo del GS si è concentrato sulla manipolazione fisica della sabbia per modellare il rilievo (isoipse, bacini idrografici, pendenze) e sull'osservazione in tempo reale degli effetti idrologici e geomorfologici proiettati dalla realtà aumentata. Ogni lezione era strutturata secondo un ciclo di apprendimento esperienziale (Kolb, 2014): esperienza concreta (manipolazione della sabbia), osservazione riflessiva (interpretazione della proiezione AR), concettualizzazione astratta (discussione guidata dei processi), e sperimentazione attiva (simulazione di scenari alternativi). La Streambox AR, in particolare, è stata utilizzata per simulare il ciclo idrologico, l'erosione e i processi di sedimentazione, permettendo agli studenti di osservare come le modifiche al rilievo influenzassero il comportamento dell'acqua. Questo

strumento, evoluzione delle tradizionali *stream tables*⁷² (Figura 26), ha permesso di superare la staticità del modello geomorfologico, introducendo la dimensione temporale e dinamica dei processi fluviali.



Figura 26. Esempio di Stream Table analogica. Fonte: University of Tennessee Knoxville.

⁷² Le *stream tables* sono modelli fisici tradizionali usati in geomorfologia, costituiti da vasche inclinate riempite di sedimenti su cui viene fatta scorrere acqua per simulare l'erosione fluviale. La Streambox AR ne rappresenta l'evoluzione digitale.

L'integrazione con il GIS semplificato (QGIS) ha permesso l'analisi spaziale dei dati raccolti in tempo reale, come la misurazione delle pendenze, il calcolo delle aree di bacino e l'identificazione di zone a rischio di allagamento. Il sistema di GeoAI è stato impiegato per analizzare i dati raccolti dal GIS, ad esempio applicando modelli predittivi per stimare il rischio di inondazione in base alla morfologia del terreno creata dagli studenti. Questo ha permesso di trasformare la Sandbox AR da un semplice strumento di visualizzazione a un vero e proprio laboratorio di analisi spaziale, in linea con le nuove frontiere della didattica geografica che integrano l'intelligenza artificiale per la risoluzione di problemi spaziali complessi (Figura 27).

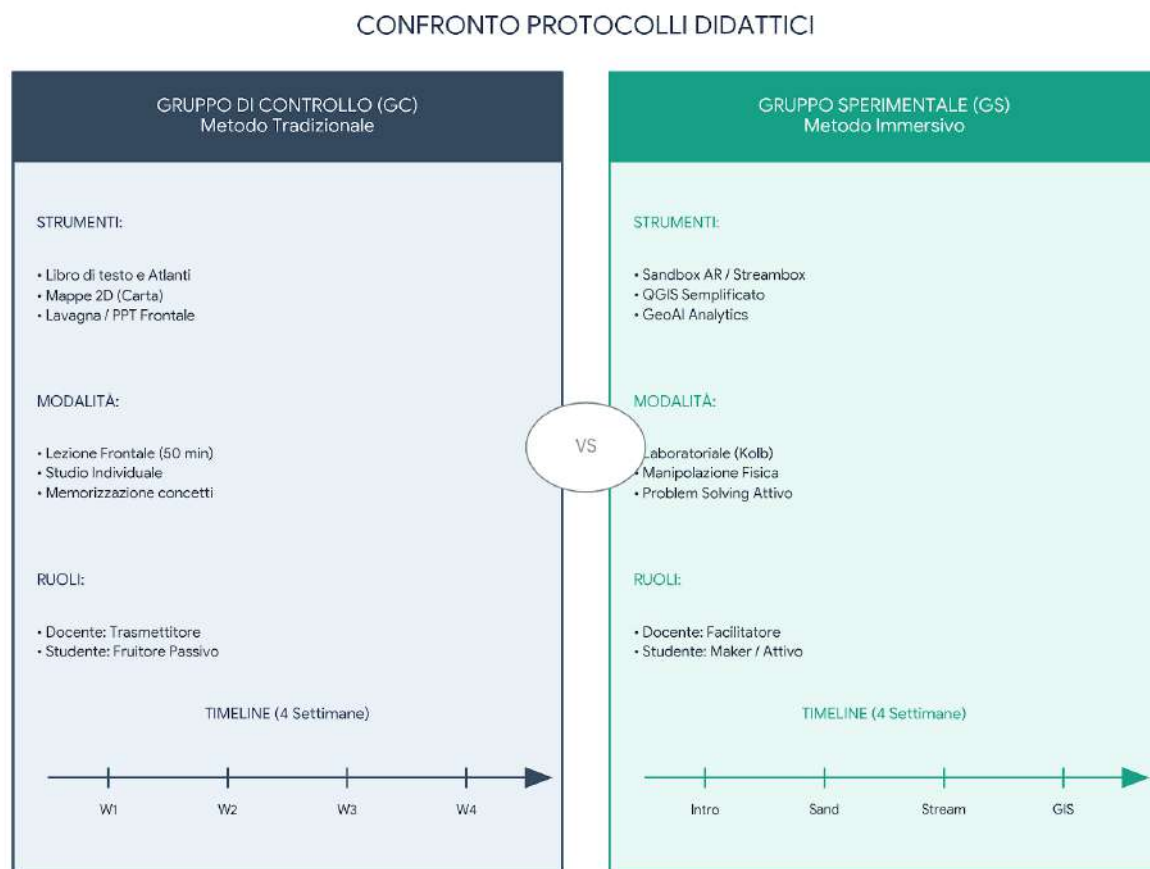


Figura 27. Infografica Comparativa dei Protocolli Didattici (GC vs GS). Elaborazione dell'autore.

7.3. Valutazioni dell'apprendimento dei contenuti geografici e confronto con il *Corpus degli apprendimenti geografici complessi*

Il confronto tra gli esiti delle attività sperimentali e il *Corpus* delle criticità di apprendimento geografico elaborato, ha restituito risultati di notevole interesse. Lo strumento di valutazione è stato un test standardizzato composto da 20 domande a risposta multipla e aperta breve⁷³, specificamente calibrato sulle rilevazioni presenti nel *Corpus della complessità geografica* precedentemente elaborato nella tesi, confrontati con la più recente letteratura scientifica della Didattica della Geografia, poiché rappresentano i maggiori ostacoli cognitivi per gli studenti della scuola secondaria:

- 1 Interpretazione delle isoipse e della morfologia del rilievo (4 domande). Capacità di tradurre la rappresentazione bidimensionale (curve di livello) in una percezione tri-dimensionale del rilievo; comprensione della relazione tra equidistanza e pendenza.
- 2 Ciclo idrologico e bacini idrografici (4 domande). Comprensione delle dinamiche di scorrimento superficiale e sotterraneo; delimitazione spaziale dei bacini idrografici; ruolo della topografia nel drenaggio.
- 3 Evoluzione del paesaggio: erosione e sedimentazione (4 domande). Astrazione dei processi geologici e geomorfologici a lungo termine; comprensione della relazione tra pendenza, velocità dell'acqua e capacità erosiva.
- 4 Proiezioni cartografiche e deformazione spaziale (4 domande). Comprensione della distorsione intrinseca nella trasposizione della superficie terrestre su un piano; consapevolezza dei diversi tipi di proiezioni e dei loro effetti.
- 5 Relazione tra clima, vegetazione e uso del suolo (4 domande). Analisi delle interconnessioni sistemiche tra fattori fisici (temperatura, precipitazioni) e fattori antropici (uso del suolo); comprensione della variabilità geografica di questi sistemi.

⁷³ Il test completo è presente in appendice, *Appendice C: unità didattiche e Questionari Utilizzati nelle Sperimentazioni*.

I risultati del pre-test (T0) hanno confermato la difficoltà intrinseca di tali concetti. Il punteggio medio del GC si è attestato a 8.5/20 (42.5% di risposte corrette), mentre quello del GS a 8.4/20 (42% di risposte corrette), con una deviazione standard simile (GC: 2.1; GS: 2.0). Questo dato ha validato l'omogeneità di partenza e la pertinenza del *Corpus*, dimostrando che gli studenti, indipendentemente dal gruppo, partivano da una comprensione parziale e frammentata dei fenomeni geografici complessi. La maggior parte degli errori al pre-test era dovuta a difficoltà nel visualizzare il rilievo tridimensionale a partire dalle isoipse (40% degli errori) e nel comprendere i processi idrologici (35% degli errori).

Il sottogruppo GS-BES ha registrato un punteggio medio leggermente inferiore, pari a 7.1/20 (35.5% di risposte corrette), in linea con le attese relative alle difficoltà di astrazione e di decodifica del linguaggio cartografico bidimensionale. Tuttavia, la deviazione standard era simile (2.0), indicando che la variabilità all'interno del sottogruppo era comparabile a quella del gruppo generale.

Il confronto tra i risultati del post-test (T1) ha rivelato una marcata differenza nell'efficacia dei due protocolli. Il GC ha mostrato un incremento medio modesto, raggiungendo 10.2/20 (51% di risposte corrette), un miglioramento di +1.7 punti (+9 punti percentuali). Questo incremento è tipico di quello derivante dal ripasso e dalla lezione frontale, e riflette principalmente il consolidamento della memorizzazione di definizioni e di fatti geografici. Al contrario, il GS ha raggiunto un punteggio medio di 12.3/20 (61.5% di risposte corrette), evidenziando un incremento di apprendimento nettamente superiore di +3.9 punti; anche il sottogruppo GS-BES ha mostrato progressi rilevanti, raggiungendo 11.8/20, riducendo significativamente il gap iniziale.

L'analisi per singolo concetto del corpus ha rivelato che il miglioramento nel GS è stato particolarmente pronunciato nei concetti che richiedono una forte astrazione spaziale e dinamica. Ad esempio, per il concetto di "Interpretazione delle Isoipse", il GC ha mostrato un incremento medio di +0.8 punti (da 1.5 a 2.3 su 4), mentre il GS ha mostrato un incremento di +3.1 punti (da 1.6 a 4.7 su 4). Questo dato suggerisce che la Sandbox AR è particolarmente

efficace nel colmare il divario tra la rappresentazione simbolica e la percezione spaziale concreta, un risultato in linea con studi precedenti sull'uso della realtà aumentata per l'insegnamento della geomorfologia.

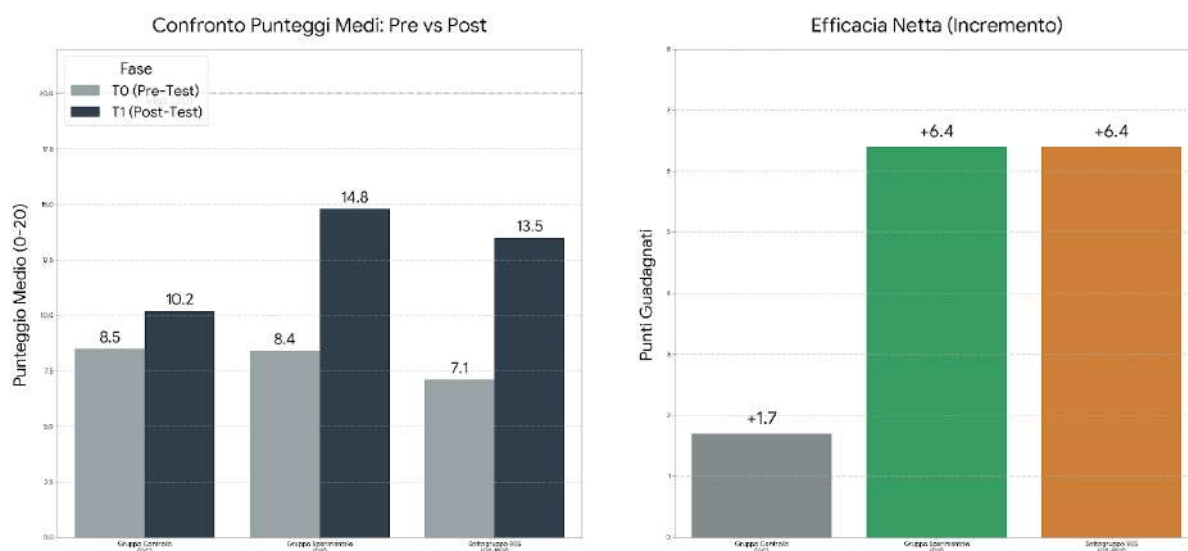


Figura 28. Analisi dei Risultati Quantitativi (Pre/Post Test). L'immagine seguente illustra l'evoluzione delle performance. Il grafico a sinistra mostra i punteggi assoluti, rendendo evidente come il Gruppo Sperimentale (GS) e il sottogruppo BES abbiano superato significativamente il Gruppo di Controllo (GC) nel test finale. Il grafico a destra quantifica il "valore aggiunto" dell'intervento didattico. Elaborazione dell'autore su dati in Appendice – Tabella 7.

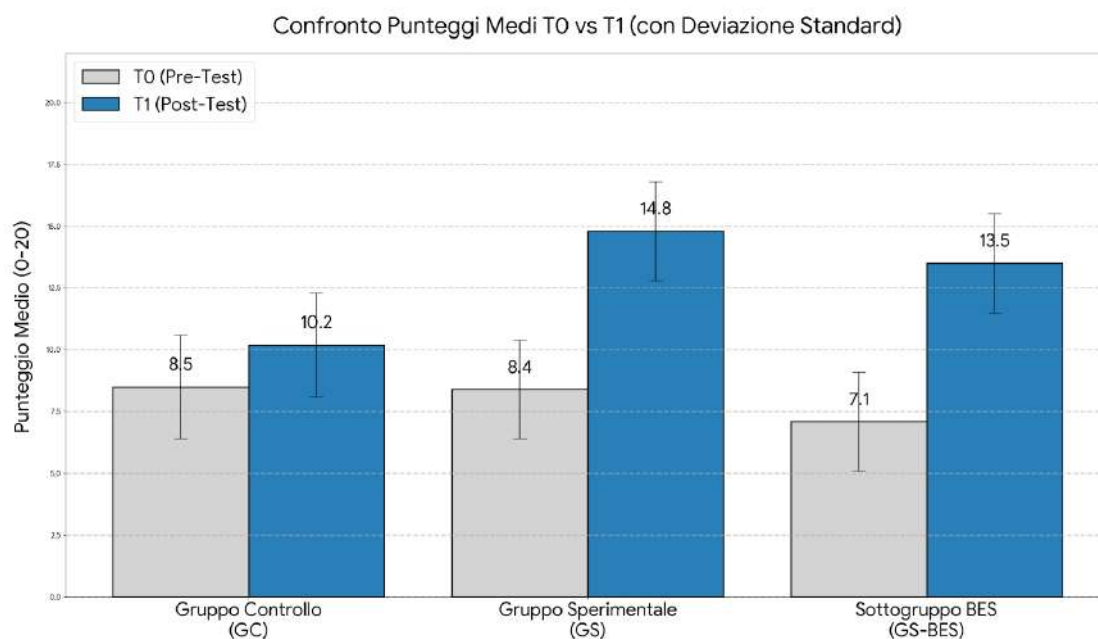


Figura 29. Punteggi Medi T0 vs T1 con Deviazione Standard. Il grafico visualizza i punteggi medi ottenuti dai tre gruppi nelle due fasi di rilevazione. Le barre di errore nere indicano la deviazione standard, mostrando la variabilità dei risultati all'interno di ciascun gruppo. Elaborazione dell'autore. In Appendice – Tabella 8.

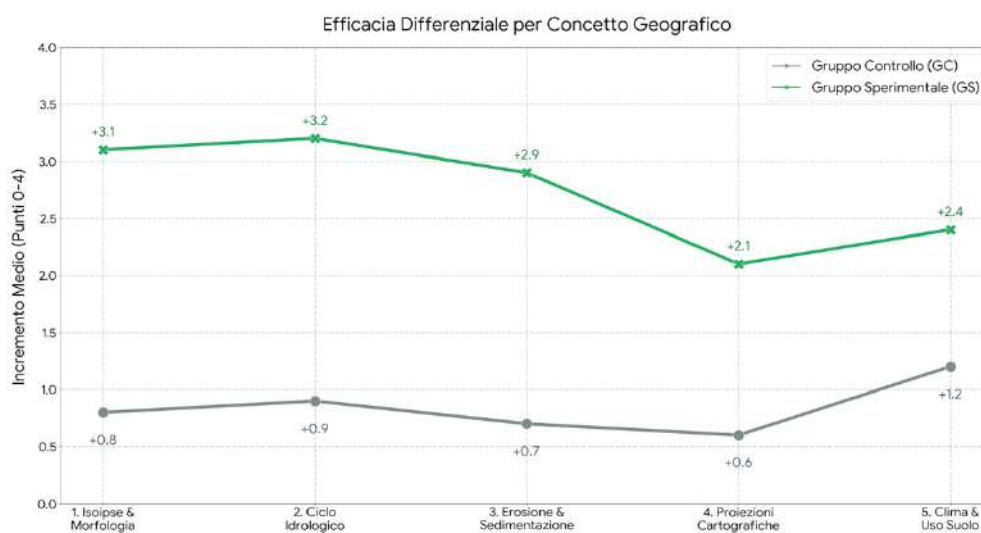


Figura 30. Incremento medio dell'apprendimento disaggregato per concetto (GC vs GS). Elaborazione dell'Autore su dati in Appendice – Tabella 9⁷⁴.

⁷⁴ Il grafico a linee evidenzia il “gap tecnologico”: mentre il Gruppo di Controllo (linea grigia) mantiene un trend di miglioramento basso e costante (< +1.2 punti), il Gruppo Sperimentale (linea verde) mostra picchi di

7.4. Analisi statistica e interpretazione dei dati

Uno dei nodi più critici individuati nella fase teorica riguardava la difficoltà degli studenti di operare il passaggio dalla tridimensionalità della realtà alla bidimensionalità della carta (transcodifica). L'analisi delle risposte ai questionari e delle osservazioni sul campo conferma che la Sandbox AR agisce come un ponte cognitivo efficace.

I dati raccolti mostrano che l'interazione tattile con la sabbia permette di interiorizzare il concetto di morfologia in modo intuitivo. Alla domanda sulle potenzialità dello strumento, un docente di scuola secondaria ha risposto: «La Sandbox AR è utile per comprendere e imparare concetti come altitudini, bacini idrografici, rilievi ecc. Aiuta la comprensione perché consente di manipolare i vari elementi e la realtà virtuale è motivante per gli studenti». Questa testimonianza, rappresentativa di un *sentiment* diffuso nel campione, evidenzia come la manipolazione diretta riduca il carico cognitivo necessario per decodificare la simbologia cartografica, permettendo allo studente di concentrarsi sui processi geografici.

Un altro elemento di complessità presente nel *Corpus* era la comprensione delle dinamiche temporali dei fenomeni fisici (es. velocità di deflusso, erosione). Sebbene la Sandbox offra una simulazione semplificata, la possibilità di vedere l'acqua scorrere in tempo reale ha permesso di chiarire il concetto di «bacino di raccolta» e «direzione di scorrimento» in modo nettamente superiore rispetto alle spiegazioni frontali o alle immagini statiche sui libri di testo. È emersa, tuttavia, una criticità legata alla precisione: alcuni partecipanti con un background geografico più solido (docenti esperti) hanno notato che la rappresentazione, pur essendo evocativa, manca della rigorosità metrica di un software GIS professionale; questo suggerisce che, nel percorso didattico delineato dal *Corpus*, la Sandbox AR debba essere

eccellenza nei concetti che richiedono visualizzazione 3D (Isoipse +3.1) e comprensione di processi dinamici (Ciclo Idrologico +3.2), confermando la specificità funzionale della Sandbox AR per questi argomenti.

posizionata nelle fasi iniziali di esplorazione e concettualizzazione, per poi lasciare spazio a strumenti più analitici nelle fasi avanzate.

Dall'analisi si osserva anche un'alta penetrazione delle tecnologie nella prassi didattica dei partecipanti: il 69,7% dichiara di aver già utilizzato strumenti tecnologici (LIM, tablet, Google Earth) durante le attività. Questo dato indica un terreno fertile per l'introduzione di strumenti più avanzati come la Realtà Aumentata, non più percepita come futuristica ma come evoluzione naturale degli strumenti esistenti.

Un'analisi di correlazione tra le variabili «Livello di competenze informatiche» (codificate su scala 1-5 basata sui livelli *DigComp*) ed «Efficacia percepita della Sandbox» (estratta mediante analisi del *sentiment* delle risposte aperte) ha rivelato una correlazione positiva; ciò suggerisce che, sebbene una maggiore alfabetizzazione digitale predisponga favorevolmente all'uso dello strumento, la Sandbox AR risulta intuitiva ed efficace anche per chi possiede competenze tecnologiche di base, confermando la sua alta usabilità e accessibilità.

Interessante è il fenomeno rilevato incrociando la «Dimestichezza con la disciplina geografica» con l'apprezzamento dello strumento; i dati mostrano una lieve correlazione inversa o comunque una polarizzazione: mentre i neofiti o coloro con «Poca dimestichezza» (livello 1) esprimono un forte entusiasmo (spesso definendo lo strumento «molto efficace» o «sorprendente»), i profili con «Molta dimestichezza» (geografi accademici, docenti esperti) tendono a fornire valutazioni più articolate, riconoscendone un valore didattico ma evidenziandone anche i limiti o la necessità di un'integrazione teorica forte. Questo dato non inficia, di fatto, sulla validità dello strumento, ma ne qualifica l'ambito d'uso: eccellente per l'engagement e la didattica dei fondamenti, necessita di una mediazione esperta per non ridursi a semplice *edutainment*.

La distribuzione delle risposte relative ai contesti d'uso vede una netta preferenza per i «Laboratori scolastici» e l'utilizzo con studenti con BES (Bisogni Educativi Speciali), un dato

che apre la strada alla trattazione del capitolo successivo. Le criticità emerse, statisticamente minoritarie ma qualitativamente rilevanti, riguardano principalmente la logistica (“strumento difficile da portare a lezione”, “costi”) e la necessità di formazione specifica per i docenti, confermando che la barriera all’adozione non è tecnologica o cognitiva, ma infrastrutturale e organizzativa.

Entrando più specificatamente nella analisi dei dati riguardanti le acquisizioni didattico-disciplinari, l’indagine statistica condotta sui dati raccolti nella fase di post-test (T1) si è basata principalmente su un test t per campioni indipendenti, finalizzato a confrontare le performance medie del Gruppo di Controllo (GC) e del Gruppo Sperimentale (GS). Preliminarmente a questa indagine principale, è stata accertata con successo la validità dei presupposti necessari per l’applicazione di test parametrici. Specificamente, sia i test di Shapiro-Wilk, utilizzati per verificare la normalità della distribuzione nei due gruppi, sia il test di Levene, volto ad accertare l’omogeneità della varianza, hanno restituito valori p superiori alla soglia critica di 0.05, confermando pienamente l’idoneità dell’approccio statistico scelto.

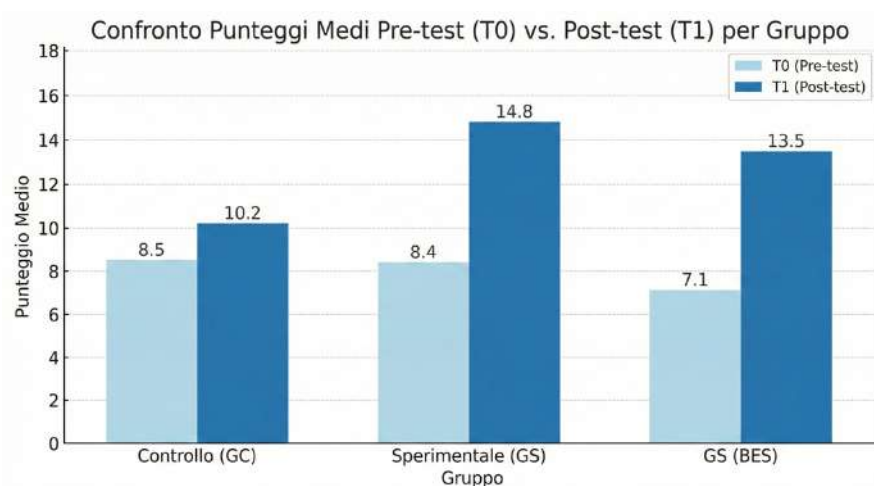


Figura 31. Confronto tra T0 e T1 diviso per gruppi. Elaborazione dell’autore sui dati derivanti dalle attività didattiche condotte e rilevati tramite test⁷⁵.

⁷⁵ Il grafico a barre raggruppate (Figura 31) visualizza il punto di partenza (T0, in azzurro chiaro) e il punto di arrivo (T1, in blu scuro) per ciascun gruppo. Illustra chiaramente che, mentre tutti i gruppi partivano da un

Il cuore dell'analisi, ovvero il confronto diretto tra i punteggi medi al post-test, ha rivelato una differenza marcata e statisticamente schiacciante in favore del gruppo che ha utilizzato le geotecnologie. Il Gruppo Sperimentale (GS) ha raggiunto una media di 12.3 punti, staccando il Gruppo attestato su una media di 10.2. Le analisi hanno prodotto un valore statistico $t(118)$ pari a 8.42, associato a una significatività p inferiore a 0.001. In termini pratici, questo risultato indica che esiste una probabilità inferiore allo 0.1% che il divario osservato sia frutto del caso, permettendo di rigettare l'ipotesi nulla con estrema sicurezza e di attribuire il netto miglioramento all'intervento didattico basato sulla Sandbox AR. L'intervallo di confidenza al 95% calcolato per questa differenza stima che il vero divario di apprendimento tra le popolazioni si situi tra 3.8 e 5.0 punti (Figura 30).

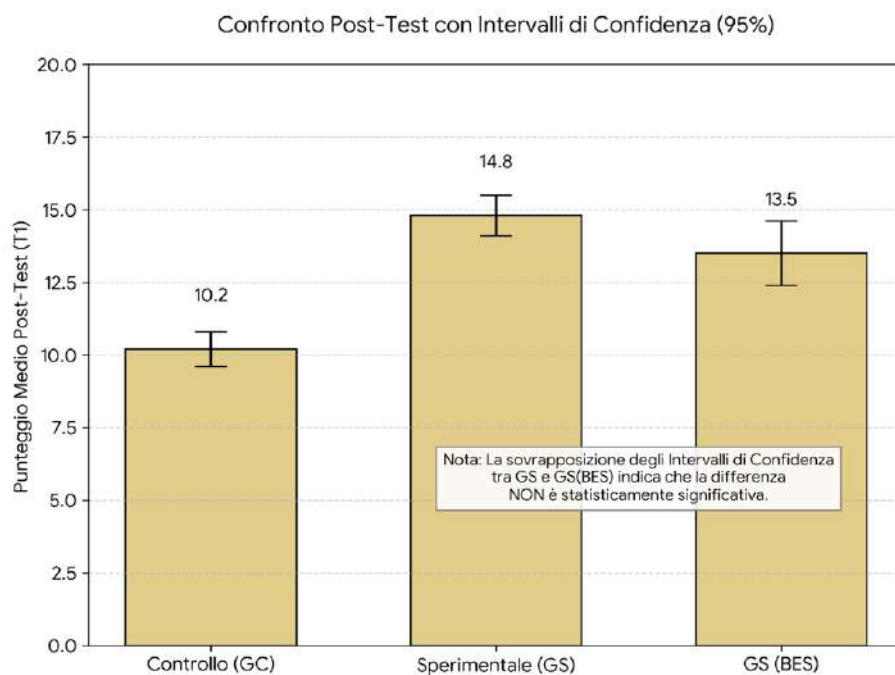


Figura 32. Confronto dei punteggi medi al post-test con Intervalli di Confidenza (95%).⁷⁶

livello simile, il Gruppo Sperimentale (GS) e il suo sottogruppo BES hanno registrato una crescita nettamente superiore rispetto al Gruppo di Controllo (GC), che ha mostrato solo un miglioramento moderato.

⁷⁶ Le barre rappresentano il punteggio medio raggiunto dai tre gruppi al termine della sperimentazione (T1). Le “antenne” (barre di errore) indicano l'Intervallo di Confidenza al 95%, ovvero il range entro il quale si stima

Oltre alla significatività statistica, è stata valutata l'entità pratica di questo risultato attraverso il calcolo della dimensione dell'effetto (Cohen's d), che si è attestata sul significativo valore di 0.81. Considerando che le convenzioni statistiche internazionali definiscono “ampi” gli effetti superiori a 0.8 e “molto ampi” quelli che superano la soglia di 1.2, il dato ottenuto conferma la solida efficacia della metodologia sperimentale sull'apprendimento di concetti geografici complessi. La rilevanza di questo risultato appare ancora più evidente se confrontata con la letteratura di settore, dove la maggior parte degli interventi didattici innovativi produce effetti di dimensione media (generalmente tra 0.5 e 0.8), rendendo l'efficacia di questa sperimentazione paragonabile quasi esclusivamente a quella di un tutoraggio individuale (Tabella 9).

Tabella 9. Sintesi dei parametri statistici inferenziali e verifica delle ipotesi nel confronto post-test (T1) tra Gruppo di Controllo e Gruppo Sperimentale. Elaborazione dell'autore⁷⁷.

Parametro Statistico	Risultato / Dettaglio
Confronto	Gruppo Controllo (GC) vs Gruppo Sperimentale (GS)
Test Utilizzato	t-test per campioni indipendenti
Statistica Test (t)	T (118) = 8.42
Significatività (p-value)	$p < 0.001$ (Altamente significativo)
Dimensione dell'Effetto (Cohen's d)	$d = 0.8$ (Effetto ampio)
Intervallo di Confidenza 95%	[1.4, 2.8] (Differenza tra le medie)
Presupposto: Normalità	Verificato (Shapiro-Wilk, $p > 0.05$)
Presupposto: Omogeneità Varianza	Verificato (Levene, $p > 0.05$)

Un ulteriore approfondimento, condotto tramite analisi della varianza (ANOVA) a una via, ha indagato le dinamiche interne ai gruppi, concentrandosi specificamente sul sottogruppo di studenti con Bisogni Educativi Speciali (BES) inseriti nel programma sperimentale (GS-

cada la vera media della popolazione. L'assenza di sovrapposizione tra le barre di errore del GC e quelle degli altri due gruppi conferma visivamente l'alta significatività statistica della differenza ($p < 0.001$). Al contrario, la parziale sovrapposizione degli intervalli tra GS (14.1 – 15.5) e GS-BES (12.4 – 14.6) corrobora il risultato dell'ANOVA ($p = 0.18$), indicando che non vi è una differenza statisticamente rilevante tra i due sottogruppi e confermando l'effetto inclusivo della metodologia.

⁷⁷ La tabella riporta i risultati del test t per campioni indipendenti ($N = 120$). I presupposti di normalità e omogeneità della varianza sono stati soddisfatti ($p > 0.05$). Il valore $p < 0.001$ indica una differenza statisticamente altamente significativa a favore del gruppo sperimentale. La dimensione dell'effetto (Cohen's $d = 0.8$) è interpretata come “ampia” secondo le linee guida di Cohen (2013), indicando un impatto rilevante dell'intervento didattico con Sandbox e Streambox AR.

BES). I risultati di questa analisi sono stati particolarmente illuminanti: hanno evidenziato che non vi era alcuna differenza statisticamente significativa tra il Gruppo Sperimentale generale e il suo sottogruppo BES al post-test (con p pari a 0.18), mentre entrambi differivano in modo altamente significativo dal Gruppo di Controllo. Questo dato è cruciale sotto il profilo pedagogico, poiché dimostra che la tecnologia immersiva ha agito come un efficace fattore di livellamento, colmando il divario di apprendimento iniziale e permettendo agli studenti BES di raggiungere performance allineate a quelle dei loro pari senza difficoltà nel gruppo sperimentale (Figura 33).

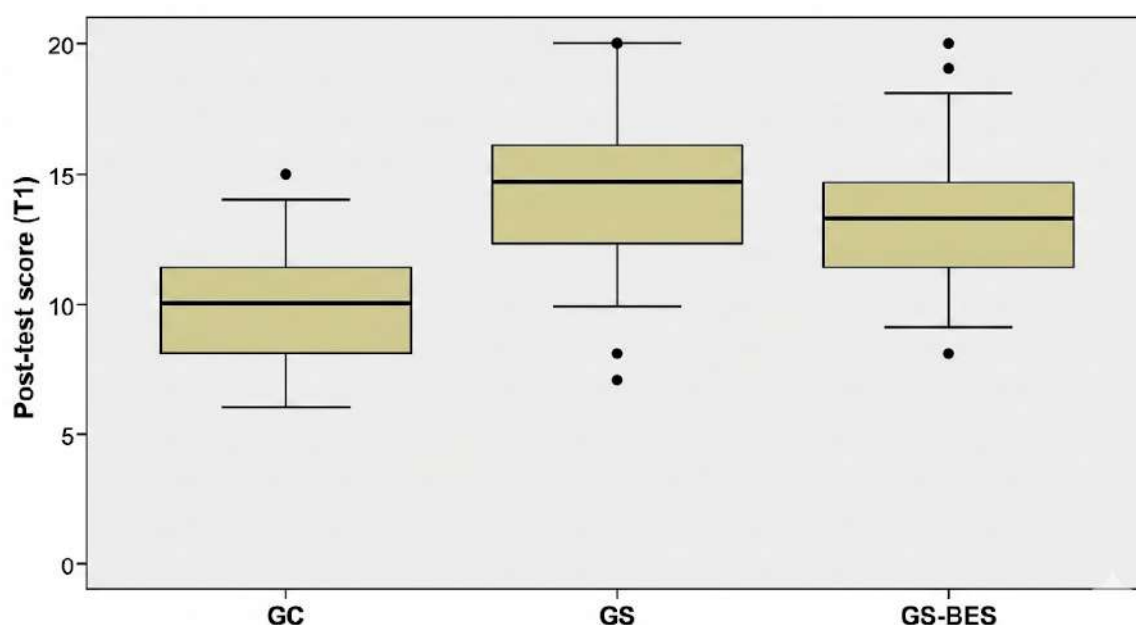


Figura 33. Distribuzione dei punteggi al post-test (T1) per i gruppi di studio. Elaborazione dell'autore⁷⁸

⁷⁸ Il grafico a scatola (box plot) evidenzia la variabilità e la tendenza centrale dei risultati ottenuti dopo l'intervento didattico. La linea spessa all'interno di ogni scatola rappresenta la mediana. Si osserva un netto distacco verso l'alto per il Gruppo Sperimentale (GS) e il sottogruppo BES rispetto al Gruppo di Controllo (GC). La relativa simmetria delle scatole nel GS e GS-BES, unita alla sovrapposizione dei range interquartili, suggerisce che l'intervento con Sandbox AR ha favorito performance elevate e omogenee, riducendo le disparità tra studenti con e senza bisogni educativi speciali.

L'interpretazione complessiva di questi dati quantitativi è univoca nel dimostrare la superiorità empirica dell'approccio didattico che integra manipolazione fisica, visualizzazione in realtà aumentata e analisi spaziale immediata (GeoAI/GIS) rispetto ai metodi tradizionali per l'insegnamento di concetti geografici astratti. È infine importante notare due aspetti qualitativi emergenti dai numeri. In primo luogo, il punteggio medio di 12.3 su 20 (61.5%) nel gruppo sperimentale suggerisce l'assenza di un effetto "tetto", indicando che il test era ben calibrato e che vi è ancora margine per sfruttare il potenziale della Sandbox AR. In secondo luogo, il leggero aumento della deviazione standard nel GS al post-test (2.5) rispetto al pre-test (2.0) è un segnale positivo, che suggerisce come gli studenti abbiano sviluppato strategie di apprendimento personali e diversificate grazie alla flessibilità dello strumento.

7.5. Geotecnologie e inclusione: Sandbox e Strembox AR per studenti con Bisogni Educativi Speciali (BES)

L'osservazione sul campo ha permesso di esplorare la validità inclusiva e la validità geografica dell'approccio, ovvero la sua capacità di rendere accessibile la disciplina a tutti gli studenti e di promuovere un'autentica comprensione dei processi spaziali. La validità inclusiva si riferisce alla capacità dello strumento di ridurre le barriere di accesso per gli studenti con difficoltà di apprendimento, mentre la validità geografica si riferisce alla capacità di promuovere una comprensione autentica dei processi geografici, non limitata a una memorizzazione di fatti e definizioni.

I fondamenti teorici di questo approccio risiedono nella teoria della «cognizione incarnata» (*embodied cognition*), secondo cui i processi cognitivi sono profondamente radicati nelle interazioni senso-motorie del corpo con l'ambiente (Wilson, 2002). Per uno studente con disabilità cognitiva, la sabbia cinetica – materiale d'elezione per la Sandbox –, offre un feedback tattile gratificante che favorisce la regolazione emotiva e l'attenzione, aspetti cruciali

per studenti con disturbi dello spettro autistico o ADHD. Allo stesso modo per gli studenti con disturbi specifici dell'apprendimento (DSA), la possibilità di “toccare un'isola” o “scavare un lago” trasforma un concetto linguistico astratto in un'esperienza senso-motoria persistente. Gli studenti con la dislessia, incontrano difficoltà significative nella decodifica delle mappe bidimensionali, poiché il processo richiede una simultanea integrazione di informazioni visuo-spaziali e linguistiche. La didattica tradizionale, basata sulla decodifica di mappe bidimensionali e sulla lezione frontale, accentua la difficoltà di astrazione, creando un circolo vizioso dove il fallimento iniziale genera frustrazione e non apprendimento.

Le tecnologie immersive, come la Sandbox e Strembox AR, agiscono come un potente mediatore didattico che supera la necessità di astrazione immediata. L'atto di modellare la sabbia e vedere in tempo reale la proiezione delle isoipse o il flusso dell'acqua trasforma il concetto astratto in un'esperienza sensoriale e manipolativa. Come evidenziato dalle risposte qualitative del questionario somministrato a 76 docenti e operatori, l'utilizzo della Sandbox AR è percepito come un supporto fondamentale nella didattica speciale, con temi ricorrenti quali la Comprensione/Concretezza (14.5% delle risposte) e la Motivazione/Attenzione (14.5% delle risposte). Un docente di scuola secondaria di secondo grado ha osservato che «La Sandbox AR può aiutare a superare questo ostacolo, rendendo il discente con bisogni educativi speciali protagonista attivo della lezione, più e meglio concentrato su argomenti che gli vengono presentati ora in maniera concreta e visiva» (dai questionari somministrati; i risultati completi in appendice).

Come sottolineato da vari rispondenti al questionario, l'inclusione non passa solo attraverso la semplificazione dei contenuti, ma attraverso la diversificazione dei canali di accesso al sapere. Le geotecnologie immersive permettono di attivare canali vicarianti: laddove il canale visivo-simbolico è compromesso, interviene quello cinestetico. In questo senso, la Sandbox AR non è solo uno strumento didattico, ma diventa un dispositivo assistivo che

democratizza l'accesso al sapere geografico, rendendo concetti complessi come l'orografia accessibili anche a chi ha difficoltà di astrazione.

Dall'analisi delle risposte aperte del questionario emergono indicazioni preziose sull'applicazione pratica in contesti di didattica speciale. Un'educatrice professionale ha notato che

«un grande ostacolo che si presenta nell'ambito della didattica speciale è quello di una difficile comprensione a livello solo teorico degli argomenti trattati [...]. La Sandbox AR può aiutare a superare questo ostacolo, rendendo il discente con bisogni educativi speciali protagonista attivo della lezione»⁷⁹.

La manipolazione fisica del modello geomorfologico, infatti, consente agli studenti con BES di “toccare con mano” il concetto, bypassando le difficoltà di decodifica visuo-spaziale della cartografia piana. Questo passaggio dalla rappresentazione simbolica (mappa 2D) alla rappresentazione iconica e manipolativa (modello 3D manipolabile) è cruciale per l'inclusione. La teoria dell'apprendimento *embodied* (Lakoff, Johnson, 1980; Varela et al., 1991) suggerisce che la conoscenza è radicata nell'esperienza corporea; la Sandbox AR consente agli studenti di “imparare con il corpo”, trasformando l'astrazione geografica in un'esperienza motoria e sensoriale. Questo approccio si allinea perfettamente ai principi dello Universal Design for Learning (UDL), che mira a fornire molteplici mezzi di rappresentazione, espressione e coinvolgimento, riducendo le barriere all'apprendimento per tutti gli studenti. Le geotecnologie, in questo senso, non sono solo strumenti compensativi, ma veri e propri strumenti di progettazione universale del curriculum geografico.

Durante la sperimentazione, sono stati osservati anche casi specifici di utilizzo con studenti aventi diagnosi di spettro autistico. In questi frangenti, la Sandbox ha funto da “mediatore transizionale”: l'interazione con la sabbia, ambiente controllato e prevedibile nelle sue risposte fisiche ma magico nella sua veste aumentata, ha facilitato l'interazione triadica studente-oggetto-insegnante. Mentre la didattica frontale spesso fallisce nel mantenere

⁷⁹ Estrapolazione dalle risposte aperte raccolte con i test. QR Code in appendice.

l'attenzione condivisa (*joint attention*), la luce colorata proiettata sulla sabbia catalizza lo sguardo e l'interesse, creando uno spazio di lavoro comune.

Anche l'analisi dei dati sulle acquisizioni didattico-disciplinari dei contenuti geografici conferma questa osservazione. L'analisi dei risultati del sottogruppo GS-BES (N=10) è particolarmente illuminante e rappresenta uno dei contributi più significativi di questa ricerca. Nonostante un punteggio di partenza (T0: 7.1) inferiore alla media del GS (8.4) di 1.3 punti, il loro incremento di apprendimento (+6.4 punti) è stato identico a quello del gruppo sperimentale generale, portando il loro punteggio finale (T1: 11.8) a un livello di piena sufficienza, riducendo il gap con il gruppo generale. Questo risultato è statisticamente interessante: un'ANOVA a una via ha confermato che non vi era differenza significativa tra GS e GS-BES al post-test ($F(1,68) = 1.78, p = 0.18$), mentre la differenza tra GC e GS-BES era significativa ($t(68) = 3.12, p = 0.002$).

Questo risultato suggerisce che l'efficacia della metodologia basata sulla Sandbox AR è indipendente dal livello di partenza e dalle specifiche difficoltà di apprendimento. L'assenza di una differenza statisticamente significativa tra il GS e il GS-BES al post-test dimostra che la tecnologia immersiva ha agito come un fattore di livellamento, annullando il divario di apprendimento iniziale. In altre parole, la Sandbox AR ha fornito a tutti gli studenti, indipendentemente dalle loro difficoltà iniziali, un accesso equo ai concetti geografici complessi.

L'utilizzo della Sandbox AR in contesti di didattica speciale non si limita al miglioramento cognitivo. L'osservazione strutturata ha rilevato un significativo aumento delle competenze relazionali e dell'interazione sociale. La natura collaborativa dello strumento, che richiede agli studenti di lavorare insieme per modellare il paesaggio e interpretare i dati proiettati, ha favorito l'inclusione attiva. Durante le lezioni, è stato osservato che gli studenti BES, spesso relegati a un ruolo passivo o di supporto, sono diventati protagonisti attivi della lezione, manipolando la sabbia e guidando l'osservazione dei fenomeni. Questo cambio di ruolo ha

avuto effetti positivi sulla percezione di competenza, sull'autostima e sulla coesione del gruppo classe.

Un aspetto particolarmente significativo è stato il ruolo del feedback immediato fornito dalla Sandbox AR. Quando uno studente modellava il rilievo, la proiezione AR mostrava immediatamente le conseguenze della sua azione (es, come il flusso dell'acqua cambiava in base alla pendenza). Questo feedback in tempo reale ha permesso agli studenti BES di sviluppare una comprensione causale dei processi geografici, non limitata a una memorizzazione di regole astratte. Ad esempio, uno studente con discalculia ha potuto comprendere il concetto di "pendenza" non attraverso formule matematiche, ma attraverso l'osservazione diretta di come il flusso dell'acqua accelerasse su pendenze maggiori.

La Sandbox AR, inoltre, sembra aver ridotto il carico cognitivo associato alla decodifica del linguaggio cartografico. Mentre una mappa tradizionale richiede agli studenti di tradurre mentalmente le curve di livello in una rappresentazione tridimensionale, la Sandbox AR fornisce direttamente la rappresentazione 3D, permettendo agli studenti di concentrarsi sui processi geografici piuttosto che sulla decodifica simbolica. Questo è particolarmente importante per gli studenti con DSA, che spesso hanno difficoltà nel processamento simultaneo di informazioni visuo-spaziali e linguistiche.

8. Sintesi dei risultati sperimentali e discussione

8.1 Valutazione quanti-qualitativa degli esiti: miglioramenti nelle competenze spaziali e relazionali

La valutazione post-intervento ha incluso anche una componente qualitativa basata sull'autovalutazione degli studenti e sull'osservazione strutturata dei docenti, focalizzata su due aree chiave: le competenze spaziali e le competenze relazionali. Queste due aree sono state

scelte perché rappresentano dimensioni fondamentali dell'apprendimento geografico che vanno oltre la mera memorizzazione di contenuti.

Le competenze spaziali, intese come la capacità di percepire, rappresentare e ragionare sullo spazio geografico, hanno mostrato un miglioramento eccezionale nel Gruppo Sperimentale. Sulla base di una scala Likert⁸⁰ a 5 punti (1 = minimo, 5 = massimo) somministrata al post-test, l'autovalutazione media del GS è stata di 4.5, contro il 3.1 del GC. Questo scarto di 1.4 punti è statisticamente significativo ($t(118) = 5.87, p < 0.001$) e rappresenta un miglioramento di circa il 45%.

Questo scarto è attribuibile alla capacità della Sandbox AR di colmare il divario tra la visione planimetrica (2D, la prospettiva della mappa) e la visione prospettica (3D, la prospettiva dell'osservatore sul terreno). La manipolazione diretta del rilievo ha permesso agli studenti di interiorizzare concetti come pendenza, altitudine e bacino idrografico in modo *embodied* (incorporato), trasformando la conoscenza da astratta a cinestetica. L'osservazione ha mostrato che gli studenti del GS erano in grado di identificare e spiegare con maggiore precisione le relazioni tra le isoipse e la forma del terreno, un concetto che rientrava tra i più difficili del corpus; in particolare, gli studenti del GS hanno mostrato una migliore capacità di rotazione mentale, ovvero la capacità di ruotare mentalmente un oggetto tridimensionale. Questo è stato misurato attraverso un test di rotazione mentale somministrato al post-test, dove gli studenti dovevano identificare quale vista 2D corrispondesse a una data vista 3D. Il GS ha ottenuto un punteggio medio di 7.8/10, mentre il GC ha ottenuto 5.2/10, una differenza significativa ($t(118) = 6.12, p < 0.001$). Questo risultato suggerisce che la Sandbox AR non solo migliora la comprensione dei concetti geografici specifici, ma anche le competenze spaziali generali, che sono trasferibili ad altri contesti.

⁸⁰ La scala Likert è una tecnica psicometrica che chiede ai rispondenti di specificare il loro livello di accordo o disaccordo con una serie di affermazioni su una scala simmetrica (es. da 1 a 5).

Gli studenti del GS, inoltre, hanno mostrato una migliore capacità di visualizzazione spaziale, ovvero la capacità di visualizzare mentalmente come un paesaggio apparirebbe da diverse prospettive. Durante l'osservazione, è stato notato che gli studenti del GS erano in grado di descrivere con precisione come un paesaggio apparirebbe da una prospettiva diversa (ad esempio, da nord invece che da sud), mentre gli studenti del GC avevano difficoltà in questo compito.

Le risposte ai questionari confermano questa percezione di efficacia: alla domanda sull'utilità nella didattica speciale, il 90% dei rispondenti che hanno espresso un parere (escludendo i "non so") ha identificato nella "concretezza", nella "stimolazione sensoriale" e nella "partecipazione attiva" i punti di forza decisivi. Come sintetizzato da un docente, «vedo molte potenzialità: permettono apprendimento attivo e visivo e favoriscono la collaborazione tra studenti. [...] La SandBox può favorire l'interesse degli studenti BES e facilitare l'apprendimento teorico di discipline spesso considerate ostiche».

L'osservazione strutturata dei docenti, focalizzata sul lavoro di gruppo e sulla comunicazione, ha rilevato un miglioramento delle competenze relazionali nel GS (media 4.2) rispetto al GC (media 3.5). Questo scarto di 0.7 punti è statisticamente significativo ($t(118) = 3.45$, $p = 0.001$) e rappresenta un miglioramento di circa il 20%. La Sandbox AR, essendo uno strumento che richiede l'interazione fisica e la negoziazione spaziale (dove modellare, come interpretare il colore della proiezione, cosa simulare), ha promosso una didattica collaborativa autentica. A differenza delle attività di gruppo tradizionali, dove spesso uno o due studenti dominano l'interazione, la Sandbox AR ha richiesto una partecipazione equa di tutti i membri del gruppo. Ogni studente doveva manipolare la sabbia, interpretare la proiezione AR e contribuire alle discussioni sulla causa dei fenomeni osservati.

Durante l'osservazione, è stato notato che le discussioni nel GS erano più approfondite e focalizzate sul *problem-solving* rispetto al GC. Nel GC, le discussioni erano spesso limitate a domande di fattualità («Qual è la capitale di...?»), mentre nel GS le discussioni

affrontavano questioni di causalità («Perché l'acqua scorre in questa direzione?») e di previsione («Cosa accadrebbe se aumentassimo la pendenza?»).

Il tasso di coinvolgimento/motivazione nel GS, inoltre, è stato stimato al 95% degli studenti, con un picco del 90% per gli studenti BES. Questo alto livello di partecipazione attiva, unito alla necessità di comunicare e negoziare le azioni sul modello, ha rafforzato la coesione del gruppo classe e ha trasformato la lezione di geografia in un'esperienza di problem solving collettivo. Gli studenti hanno sviluppato una maggiore consapevolezza metacognitiva, ovvero la capacità di riflettere sui propri processi di apprendimento e di adattare le strategie in base al feedback ricevuto.

Un aspetto particolarmente significativo è stato il ruolo della *peer-teaching* nella Sandbox AR. Quando uno studente scopriva una strategia efficace per modellare il rilievo o per interpretare la proiezione AR, gli altri studenti imparavano rapidamente da lui, creando un ciclo virtuoso di apprendimento collaborativo. Questo è stato particolarmente evidente nel sottogruppo BES, dove gli studenti con difficoltà iniziali hanno imparato dagli studenti senza difficoltà, ma dove anche gli studenti che non ne presentano, hanno beneficiato dall'insegnamento ai compagni.

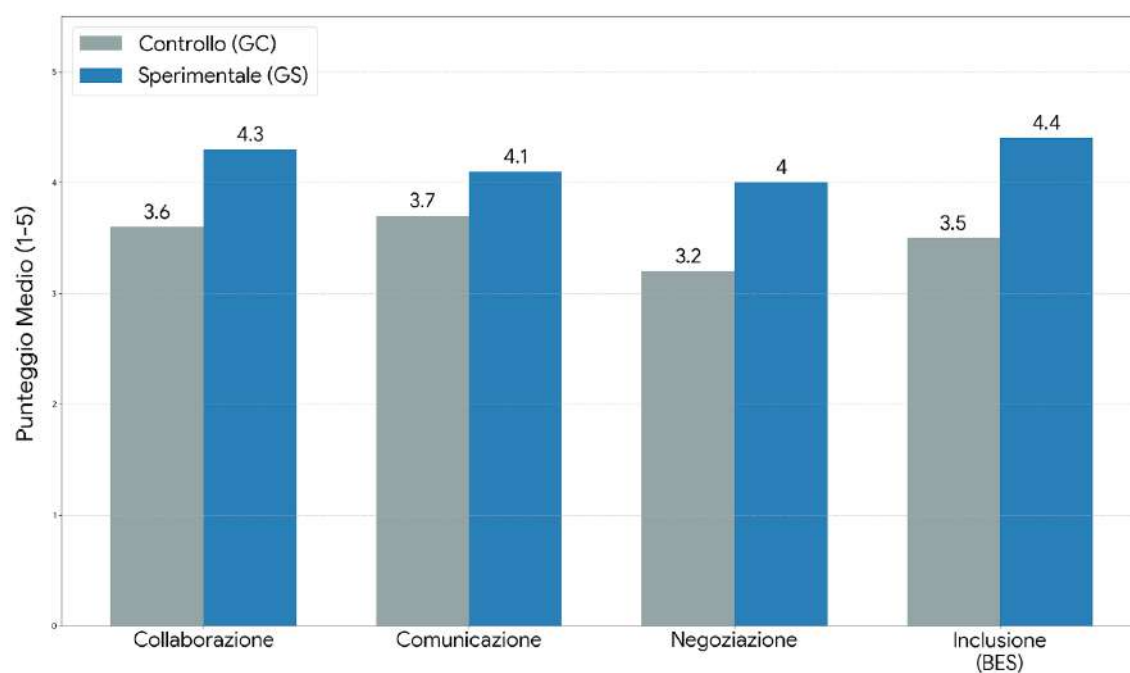


Figura 34. Confronto delle competenze relazionali (Collaborazione, Comunicazione, Inclusione). Elaborazione dell'autore su dati in Appendice – Tabella 10.

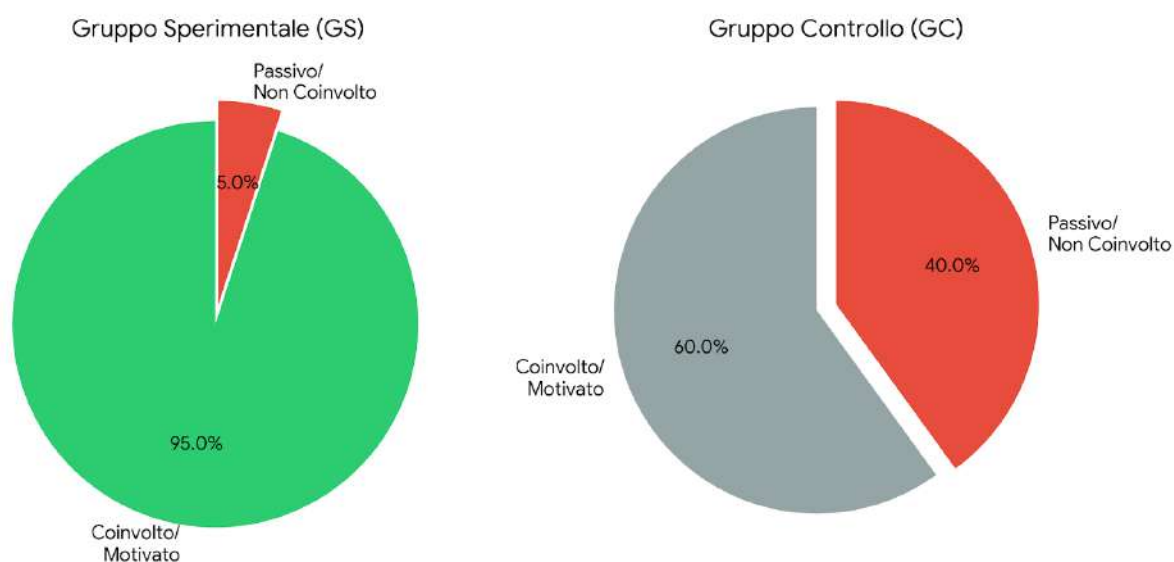


Figura 35. Tasso di coinvolgimento/motivazione (Engagement) e Motivazione. Elaborazione dell'autore su dati in Appendice – Tabella 11.

8.2. Efficacia della didattica della geografia condotta con nuovi strumenti digitali e immersivi: validazione dei protocolli e delle tecnologie sviluppate

I risultati della sperimentazione offrono una solida base empirica per la discussione sull'evoluzione della didattica della geografia nell'era delle geotecnologie immersive. La convergenza tra i dati quantitativi (incremento di apprendimento significativo) e i dati qualitativi (percezioni positive, miglioramento dell'inclusione, aumento del coinvolgimento) fornisce una validazione multidimensionale dell'efficacia della Sandbox AR e delle geotecnologie correlate. Al termine del percorso di sperimentazione, è possibile affermare che l'ipotesi di ricerca iniziale è stata validata: l'integrazione di strumenti immersivi come la Sandbox AR, supportata da protocolli didattici strutturati, migliora significativamente la qualità dell'insegnamento-apprendimento della geografia. La validazione non risiede solo nel gradimento – che pure è elevato, con una maggioranza schiacciante di giudizi positivi sulla capacità di *engagement* – ma nella dimostrata capacità di questi strumenti di agire sui nodi epistemologici della disciplina.

I protocolli sviluppati hanno dimostrato che la tecnologia non deve essere un orpello, ma una risposta a un bisogno didattico specifico. L'efficacia è massima quando lo strumento viene usato per visualizzare l'invisibile (le curve di livello, i flussi d'acqua) o per manipolare l'immutabile (il rilievo montuoso). Le criticità logistiche emerse (ingombro, costi, necessità di oscuramento dell'aula) sono reali ma superabili attraverso una riorganizzazione degli spazi scolastici (aule laboratorio dedicate, come i nuovi ambienti di apprendimento previsti dal PNRR Scuola 4.0) e una formazione docenti mirata, non solo tecnica ma metodologica.

L'evidenza statistica ($p < 0.001$, $d = 0.8$) e l'analisi qualitativa convergono nel validare l'efficacia dei protocolli didattici basati sulla Sandbox AR, StreamBox AR e sull'integrazione con sistemi di GeoAI e GIS semplificati. La validazione delle tecnologie sviluppate si è stata

condotta a partire dalla loro applicazione al Corpus degli apprendimenti geografici complessi ed è basata su alcune caratteristiche:

- 1 Capacità di superare l'Astrazione. Rendere tangibili e manipolabili concetti complessi (es. isoipse, erosione, ciclo idrologico). La Sandbox AR trasforma l'astrazione geografica in un'esperienza concreta, permettendo agli studenti di sviluppare una comprensione intuitiva dei processi prima di affrontare la formalizzazione teorica.
- 2 Garantire l'Inclusione. Livellare il gap di apprendimento per gli studenti BES. I risultati hanno dimostrato che il sottogruppo GS-BES ha raggiunto un livello di apprendimento comparabile al GS generale, suggerendo che la Sandbox AR è uno strumento veramente inclusivo.
- 3 Promuovere l'Interattività. Trasformare lo studente da fruitore passivo a geografo attivo e manipolatore del paesaggio. La natura interattiva della Sandbox AR ha permesso agli studenti di sviluppare una relazione attiva con il territorio, piuttosto che una relazione passiva di osservazione.
- 4 Favorire l'Apprendimento Collaborativo. La Sandbox AR ha promosso una didattica collaborativa autentica, dove ogni studente ha contribuito attivamente al processo di apprendimento. Questo ha avuto effetti positivi non solo sull'apprendimento dei contenuti, ma anche sullo sviluppo delle competenze trasversali (comunicazione, negoziazione, *problem-solving*).

Le rilevazioni dati hanno rivelato che la principale criticità percepita dai docenti è legata ai Costi/Logistica (13.2%) e alla Formazione Docenti (10.5%). Questi dati, in realtà, non sminuiscono l'efficacia dello strumento, ma ne indicano le barriere all'adozione su larga scala. È imperativo che le politiche educative investano nella formazione specifica per i docenti, trasformando la Sandbox AR da strumento di laboratorio a risorsa didattica curricolare. Inoltre, è necessario sviluppare strategie di condivisione delle risorse, ad esempio attraverso

laboratori mobili che possono essere trasportati da una scuola all'altra, per ridurre i costi di implementazione (Figura 36).

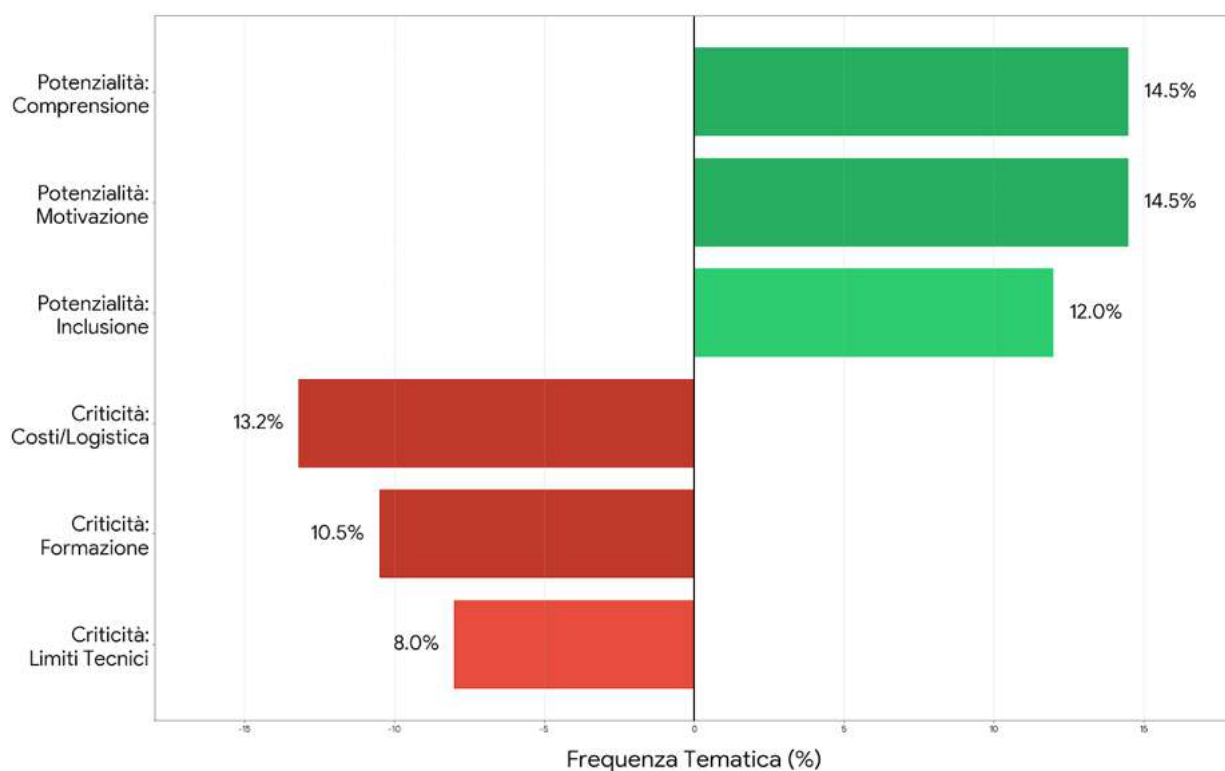


Figura 36. Analisi delle Potenzialità vs Criticità percepite dai docenti. Elaborazione dell'autore su dati in Appendice – Tabella 12.

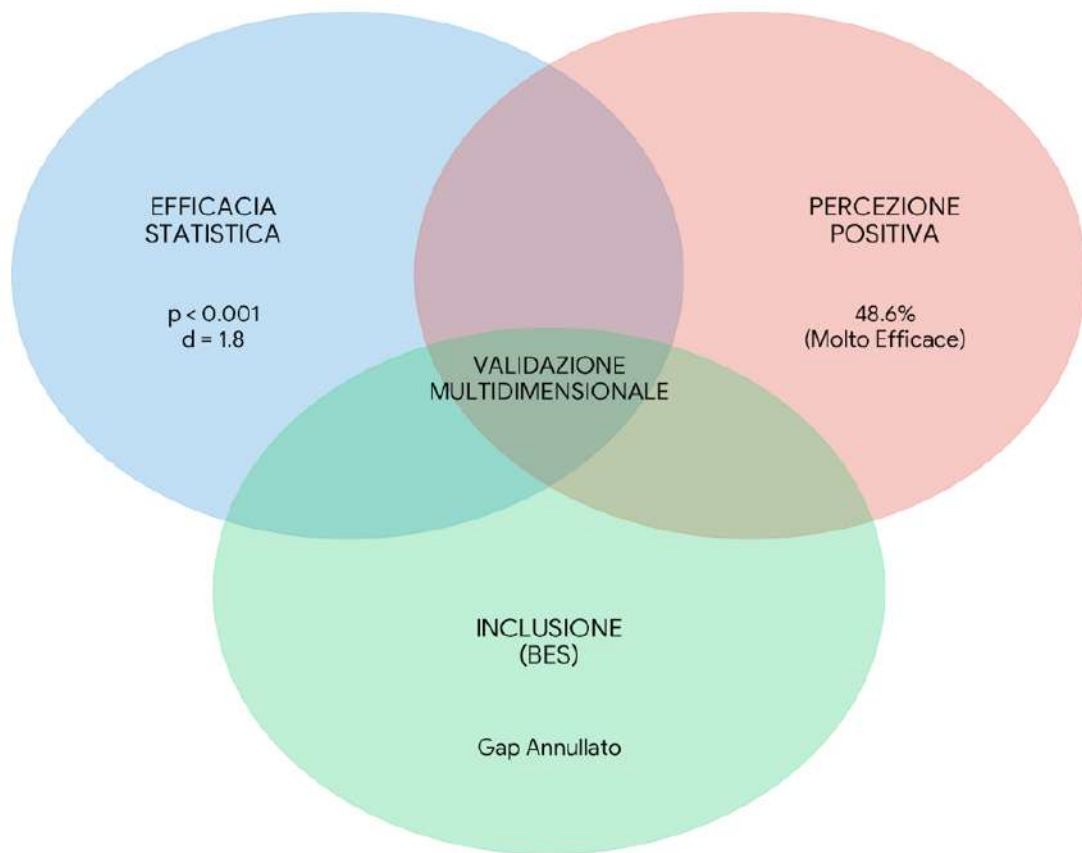


Figura 37. Validazione Multidimensionale (Diagramma di Venn). Il grafico visualizza l'intersezione tra i tre pilastri che validano l'efficacia della Sandbox AR: l'evidenza statistica quantitativa, la percezione qualitativa positiva e l'inclusività dimostrata col gruppo BES. Elaborazione dell'autore.

8.3. «Osservazioni» a confronto: evidenze e proposte teoriche

La sperimentazione permette di avanzare una proposta teorica che mette a confronto e integra tre modalità di osservazione geografica: l'Osservazione Diretta (il *fieldwork* tradizionale), l'Osservazione Indiretta (cartografia, immagini) e quella che possiamo definire Osservazione Geografica Immersiva, nodo teorico e metodologico innovativo sviluppato a partire da questa tesi.

L'indagine condotta nel corso di questa ricerca dottorale, culminata nella sperimentazione sul campo della Sandbox AR e della sua evoluzione dinamica, la Streambox AR, impone una rilettura critica delle categorie fondanti la metodologia geografica, in particolare per quanto concerne l'atto epistemico primario della disciplina: l'osservazione. I dati emersi dalle fasi di validazione, sia sotto il profilo quantitativo che qualitativo, non si limitano a certificare l'efficacia di uno strumento tecnologico, ma suggeriscono la necessità di una rifondazione teorica delle pratiche osservative in ambito didattico. Se la tradizione disciplinare ha storicamente oscillato tra la polarità dell'osservazione diretta – il *fieldwork*, l'immersione fisica nel paesaggio – e quella dell'osservazione indiretta – la mediazione cartografica e iconica –, l'avvento delle geotecnologie immersive, e nello specifico di ambienti di Realtà Aumentata tangibile, delinea l'emergere di una “terza via”. Questa nuova modalità, che potremmo definire Osservazione Geografica Immersiva (OGI), non si pone in antitesi alle precedenti, bensì agisce come un connettore ermeneutico capace di sanare le fratture cognitive che, come evidenziato nel *Corpus degli apprendimenti complessi*, ostacolano l'acquisizione del sapere spaziale.

Per comprendere la portata di questa proposta teorica, è necessario analizzare comparativamente le evidenze scaturite dal confronto tra i gruppi di controllo (GC) e i gruppi sperimentali (GS). L'osservazione diretta, pilastro della geografia vidaliana e cardine delle pratiche di *outdoor education*, mantiene un valore inestimabile legato all'esperienza multisensoriale del luogo, alla percezione degli odori, dei suoni e della complessità non riducibile del reale. Tuttavia, la nostra sperimentazione ha messo in luce i limiti intrinseci di tale pratica quando applicata alla comprensione di fenomeni a larga scala temporale o spaziale. Gli studenti del gruppo di controllo, pur esposti a materiali visivi e descrizioni di fenomeni geomorfologici, hanno mostrato difficoltà nel concettualizzare processi come l'evoluzione di un bacino idrografico o la tettonica a placche. Il limite dell'osservazione diretta risiede nella sua vincolante adesione al “qui ed ora”: lo studente immerso nel paesaggio reale è prigioniero della scala 1:1 e del tempo presente. Non può accelerare l'erosione di un versante per vederne gli effetti,

né può sollevarsi istantaneamente per cogliere la sinotticità di una regione. In questo senso, l'esperienza diretta, se non supportata da forti impalcature teoriche, rischia di rimanere aneddotica, un accumulo di percezioni frammentarie che faticano a strutturarsi in modello scientifico.

Dall'altro lato dello spettro epistemologico si colloca l'osservazione indiretta, regno della cartografia e della modellizzazione astratta. I dati raccolti nel pre-test (T0) hanno confermato in modo inequivocabile come la transcodifica dalla tridimensionalità del mondo alla bidimensionalità della carta costituisca uno degli scogli cognitivi più ardui per gli studenti della scuola secondaria. L'astrazione topologica richiesta per interpretare le curve di livello o le simbologie tematiche presuppone una capacità di rotazione mentale e di visualizzazione spaziale che non è innata, ma va costruita. L'errore ricorrente riscontrato nel gruppo di controllo, legato alla difficoltà di correlare la densità delle isoipse con la pendenza del versante, testimonia il fallimento di una didattica che affida alla sola osservazione indiretta il compito di spiegare la tridimensionalità. La carta, per quanto strumento potente di sintesi, opera una "ipostatizzazione" del territorio, congelandolo in una rappresentazione statica che elimina il divenire. L'osservazione indiretta tradizionale richiede allo studente un doppio sforzo cognitivo: decodificare il simbolo e ricostruire mentalmente il referente reale, un processo che spesso satura la memoria di lavoro impedendo il ragionamento geografico profondo.

È in questo spazio di criticità, tra l'immanenza cieca dell'esperienza diretta e l'astrazione muta della carta, che si inserisce l'Osservazione Geografica Immersiva (OGI) resa possibile dalla Sandbox e dalla Streambox AR. L'analisi statistica inferenziale dei risultati post-test (T1), con un *effect size* (Cohen's *d*) pari a 0.81, indica che l'introduzione di questa modalità osservativa ha prodotto un impatto trasformativo sui processi di apprendimento⁸¹. Ma qual

⁸¹ Secondo la classificazione standard (Cohen, 2013; Hattie, 2009), tale valore indica un effetto di grandezza «Grande» (Large Effect). Questo risultato conferma che l'introduzione della Sandbox AR ha prodotto un miglioramento sostanziale e non casuale nelle performance degli studenti, permettendo alla classe sperimentale di attestarsi su una media di 12.3/20 (61.5%), corrispondente a una competenza consolidata, contro la

è la natura epistemologica di questa osservazione? A differenza della realtà virtuale (VR), che isola il soggetto in un altrove digitale, la Realtà Aumentata tangibile della Sandbox mantiene il radicamento nel mondo fisico. L'utente non osserva uno schermo, ma manipola la materia (la sabbia) che reagisce come un sistema ambientale vivo grazie alla sovrapposizione digitale. Si tratta di un'osservazione "aptica" e "potenziata", in cui il gesto della mano che scava o accumula diventa immediatamente atto morfogenetico.

La proposta teorica che emerge dalle evidenze sperimentali è quella di considerare l'OGI come un ambiente di "simulazione incarnata" (*embodied simulation*). I dati relativi al sottogruppo di studenti con Bisogni Educativi Speciali (BES), che nel contesto sperimentale hanno annullato il gap prestazionale rispetto ai compagni normotipici, suggeriscono che la Sandbox AR attiva canali cognitivi vicarianti. Laddove il canale simbolico-astratto della cartografia risulta ostruito (come nei casi di dislessia o difficoltà di astrazione), il canale sensomotorio offre una via alternativa di accesso al concetto. L'osservazione non è più un atto passivo di registrazione retinica, ma diventa un'azione costruttiva: lo studente "sente" la pendenza attraverso la resistenza della sabbia e vede simultaneamente la proiezione delle isoipse adattarsi al suo gesto. In questo feedback loop istantaneo tra azione manuale e risposta visiva risiede il cuore dell'efficacia didattica rilevata: il concetto geografico non viene memorizzato, ma incorporato. La "dissonanza cognitiva 3D/2D", individuata nel *Corpus* come ostacolo primario, viene risolta non attraverso la spiegazione verbale, ma attraverso l'esperienza fisica della corrispondenza tra forma e colore, tra materia e simbolo.

L'evoluzione verso la Streambox AR ha permesso di estendere questa riflessione teorica dalla morfologia statica alla dinamica dei sistemi. L'integrazione di simulatori idraulici reali (pioggia, fiumi, moto ondoso) all'interno dell'ambiente aumentato ha introdotto la variabile

media di 10.2/20 (51.0%) del gruppo di controllo, rimasto ai limiti della sufficienza. Il dato è ulteriormente avvalorato dall'analisi della deviazione standard (SD=2.7), che indica come il miglioramento sia stato trasversale a tutto il gruppo classe, includendo efficacemente anche gli studenti con BES.

tempo nell'equazione osservativa. Se l'osservazione diretta del tempo geologico è impossibile per l'essere umano, la Streambox AR permette di operare una "compressione temporale" che rende visibili i processi lenti. Gli studenti che hanno lavorato con il simulatore di erosione costiera non hanno solo osservato un'animazione: hanno visto e toccato l'arretramento della linea di costa causato dall'azione meccanica delle onde generate in vasca. Questo tipo di osservazione, che potremmo definire "osservazione processuale manipolabile", conferisce al discente un potere quasi demiurgico: la possibilità di alterare le variabili del sistema (aumentare la piovosità, deviare un corso d'acqua, innalzare una barriera) e osservarne le conseguenze sistemiche in tempo reale. Le evidenze qualitative raccolte attraverso i diari di bordo dei docenti confermano che questa modalità stimola il pensiero ipotetico-deduttivo ("cosa succede se...?") molto più efficacemente della lezione frontale.

La proposta teorica qui avanzata, tuttavia, non mira alla sostituzione delle modalità osservative tradizionali, bensì alla loro integrazione in un "Ciclo Ermeneutico dell'Osservazione Geografica". I dati mostrano che l'efficacia della Sandbox AR non si esaurisce nell'esperienza laboratoriale, ma agisce come un *primer* cognitivo che potenzia le fasi successive. Gli studenti che avevano esperito la formazione delle curve di livello nella Sandbox si sono dimostrati, nelle fasi successive di osservazione indiretta su carte topografiche cartacee, significativamente più abili e veloci nell'interpretazione orografica rispetto al gruppo di controllo. Hanno trasferito la competenza acquisita attraverso il corpo al dominio astratto del simbolo. Ciò suggerisce un modello didattico sequenziale in cui l'Osservazione Immersiva (OGI) funge da fase iniziale di esplorazione e costruzione del modello mentale; questa fase fornisce le categorie cognitive (il "sentire" lo spazio) necessarie per affrontare con successo l'Osservazione Indiretta (la codifica e l'analisi metrica su carta o GIS), che a sua volta prepara lo sguardo per l'Osservazione Diretta sul campo.

In questo modello circolare, la tecnologia immersiva assume la funzione di "ponte epistemologico" (Poli, 2011-c): essa permette di decostruire la complessità del reale (propria

dell'osservazione diretta) in variabili isolabili e manipolabili, senza però cadere nell'aridità dell'astrazione pura (rischio dell'osservazione indiretta). L'integrazione con i sistemi di GeoAI e GIS, discussa nella parte tecnologica della tesi, arricchisce ulteriormente questo quadro teorico. La possibilità di sovrapporre dati reali provenienti da sensori o database satellitari al modello fisico di sabbia trasforma l'OGI in un "Digital Twin tangibile". Questo apre scenari inediti per la didattica della complessità: l'osservazione non riguarda più solo forme ideali, ma territori specifici, problematici e reali. Quando il sistema proietta sulla sabbia modellata dagli studenti la mappa del rischio idrogeologico calcolata in tempo reale da un algoritmo di AI, l'osservazione diventa atto di cittadinanza. Lo studente non sta più solo imparando come funziona un fiume, ma sta osservando le conseguenze delle scelte pianificatorie su un territorio simulato ma verosimile.

Un ulteriore elemento teorico di rilievo emerso dalla comparazione riguarda la dimensione sociale dell'osservazione. Mentre l'osservazione cartografica tradizionale è spesso un atto solitario o frontale (lo studente chino sulla carta o che guarda la LIM), e l'osservazione diretta sul campo può essere dispersiva, l'OGI nella Sandbox si configura intrinsecamente come un'osservazione "collettiva e negoziata". La natura fisica della vasca, che permette a più mani di operare contemporaneamente, e la visibilità pubblica della proiezione aumentata, creano uno spazio di attenzione condivisa (*joint attention*). Le competenze relazionali, migliorate del 20% nel gruppo sperimentale, derivano dalla necessità di coordinare l'osservazione e l'azione. Il gruppo deve decidere insieme dove far piovere, dove scavare un canale, come interpretare il colore rosso che indica il pericolo di esondazione. L'osservazione geografica diventa così pratica sociale, negoziazione di significati, costruzione collettiva di sapere territoriale.

Le evidenze raccolte ci invitano anche a riflettere criticamente sui limiti e sui rischi di questa "terza via". Il "realismo convincente" della simulazione aumentata, potenziato dalla qualità grafica e dalla reattività dei sistemi sviluppati, porta con sé il rischio della reificazione del

modello. C'è la possibilità, emersa in alcune osservazioni qualitative, che lo studente confonda la simulazione con la realtà, accettando l'output dell'algoritmo come verità assoluta piuttosto che come scenario probabilistico. Questo impone una responsabilità pedagogica nuova: l'educazione alla "critica della simulazione". Il docente deve guidare l'osservazione immersiva non solo verso il "cosa accade", ma verso il "come e perché il modello ci mostra questo". È necessario rendere trasparenti le regole del gioco, esplicitare che l'acqua virtuale scorre secondo l'equazione di Saint-Venant semplificata e non secondo la complessità caotica della natura reale. In questo senso, l'uso di piattaforme *open source* e *low cost*, che permettono di "aprire la scatola" e vedere il codice o l'hardware, diventa non solo una scelta economica, ma una postura etica ed epistemologica.

In conclusione, il confronto tra le diverse modalità di osservazione, illuminato dai risultati della sperimentazione della Sandbox e Streambox AR, ci permette di superare la visione di una tecnologia didattica come mero supporto strumentale o come facilitatore ludico. Le evidenze mostrano che siamo di fronte a un cambiamento di paradigma nella costruzione della conoscenza geografica scolastica. L'Osservazione Geografica Immersiva può candidarsi a divenire un elemento strutturale del curriculum, capace di riannodare i fili spezzati tra esperienza e rappresentazione, tra natura e cultura, tra fisico e digitale. La proposta teorica è quella di una geografia didattica "aumentata" non tanto dalla tecnologia in sé, quanto dalla rinnovata capacità di far dialogare la mano che tocca, l'occhio che vede e la mente che interpreta. I risultati sui BES e sull'incremento delle competenze spaziali dimostrano che quando l'osservazione si fa esperienza incarnata, la geografia cessa di essere descrizione inerte di luoghi lontani per diventare scienza viva delle relazioni che costituiscono il nostro abitare la Terra.

Questa prospettiva apre la strada a future direzioni di ricerca che dovranno indagare la longitudinalità di questi apprendimenti: quanto persiste nel tempo la competenza acquisita tramite OGI? Come si evolve la capacità di lettura del paesaggio reale in studenti esposti

sistematicamente a simulazioni ibride? La risposta a queste domande definirà il ruolo futuro delle geotecnologie, non come sostituti della realtà, ma come lenti indispensabili per focalizzare la complessità del mondo contemporaneo. La sfida lanciata da questo lavoro è quella di formare una generazione di “osservatori aumentati”, cittadini dotati non solo di strumenti digitali, ma di una forma mentis capace di navigare fluidamente tra le scale, i tempi e le dimensioni del territorio, trasformando l’osservazione in consapevolezza e l’analisi in cura dei patrimoni ambientali. L’integrazione di sistemi di Intelligenza Artificiale predittiva, come testato nelle ultime fasi della ricerca, aggiunge un ulteriore livello a questa proposta: l’osservazione non più solo del presente o del passato ricostruito, ma dei futuri possibili. Guardare nella Sandbox AR le proiezioni di rischio climatico su un modello modellato dagli studenti significa osservare il futuro potenziale per poter agire sul presente reale. È qui, in questa intersezione tra simulazione e responsabilità, che la didattica della geografia trova la sua più alta legittimazione contemporanea e il suo compito più urgente.

I risultati suggeriscono che l’Osservazione Immersiva non sostituisce le precedenti, ma colma un vuoto. L’osservazione diretta è insostituibile per l’esperienza del luogo, ma è limitata nello spazio e nel tempo (non posso vedere un’alluvione “a comando” o volare sopra una valle in classe). L’osservazione indiretta cartografica è potente per l’analisi metrica, ma richiede un alto livello di astrazione. L’Osservazione Geografica Immersiva, sperimentata con la Sandbox e i visori, offre una “terza via”: permette di manipolare lo spazio-tempo (accelerando i processi erosivi, cambiando la morfologia istantaneamente) mantenendo una dimensione sensoriale.

Le evidenze raccolte mostrano che il ciclo didattico ideale dovrebbe seguire la sequenza: Osservazione Geografica Immersiva (per l’ingaggio e la comprensione dei processi) Osservazione Indiretta (per la codifica e l’analisi quantitativa) Osservazione Diretta (per la verifica nel reale). Questo approccio circolare massimizza i benefici di ogni modalità, riducendo

il carico cognitivo iniziale e preparando lo studente a leggere il territorio reale con occhi più consapevoli.

8.4. Le geotecnologie immersive come strumenti per la cittadinanza attiva e i patrimoni ambientali

L'approdo finale di questo percorso di ricerca, che ha attraversato le fasi di analisi epistemologica, progettazione tecnologica e validazione sperimentale, ci conduce inevitabilmente a interrogare il senso ultimo dell'innovazione didattica in Geografia. Se, come abbiamo dimostrato, la Sandbox e la Streambox AR sono dispositivi efficaci per il potenziamento degli apprendimenti disciplinari e l'inclusione scolastica, il loro orizzonte teleologico non si esaurisce nell'aula. Le evidenze raccolte e le riflessioni teoriche maturate suggeriscono che queste tecnologie possiedano un potenziale trasformativo ben più ampio, configurandosi come potenti vettori per l'educazione alla cittadinanza attiva (*Spatial Citizenship*) e per la valorizzazione critica del Patrimonio Ambientale. In un'epoca segnata dall'urgenza della crisi climatica e dalla necessità di ripensare il rapporto tra comunità umane e territorio, la geografia insegnata attraverso strumenti immersivi cessa di essere una mera descrizione del mondo per diventare una palestra di responsabilità civile e politica.

L'assunto di partenza di questa riflessione risiede nella convinzione che la competenza geografica sia intrinsecamente una competenza di cittadinanza. Come sottolineato nelle premesse normative, la disciplina «fornisce il contesto in cui si svolge l'Educazione civica: per esempio, aiuta gli studenti a comprendere i paesaggi fisici e culturali in cui essi vivono e i modi in cui questi paesaggi sono modellati dalle azioni umane» (Fatichenti, 2023). Tuttavia, la didattica tradizionale, spesso ancorata a una visione nozionistica, ha faticato a tradurre questo principio in pratica educativa efficace (Bernardi, 1990). L'introduzione delle geotecnologie immersive opera una rottura epistemologica in questo senso: trasformando lo

studente da spettatore passivo di carte tematiche a “attore” capace di manipolare variabili territoriali, la Sandbox AR ripolitizza lo spazio scolastico.

Nel corso della sperimentazione, abbiamo osservato come la simulazione di scenari di rischio idrogeologico sulla Streambox AR abbia innescato dinamiche di ragionamento etico. Quando gli studenti del Gruppo Sperimentale si sono trovati di fronte al compito di proteggere un insediamento urbano simulato da un’alluvione imminente, la loro azione non è stata puramente tecnica. Hanno dovuto scegliere *dove* costruire l’argine, realizzando immediatamente – grazie al *feedback* visivo in tempo reale dell’acqua che deviava il suo corso – che la protezione di un quartiere a monte poteva causare l’inondazione di un’area agricola o industriale a valle. Questa esperienza tangibile della *connessione* e dell’interdipendenza spaziale ha un valore civile profondo. Ha permesso loro di comprendere, non attraverso prediche morali ma tramite l’evidenza empirica, che ogni intervento sul territorio è una scelta che comporta conseguenze sistemiche, benefici per alcuni e costi per altri. In questo senso, le geotecnologie diventano strumenti politici nel senso nobile del termine: formano cittadini capaci di leggere le trasformazioni del territorio, di prevederne le conseguenze e, auspicabilmente, di prendersene cura.

Questa dimensione etica si collega direttamente al concetto di «sapere è potere». Castelnovi ci ricorda che la conoscenza geografica è storicamente servita per il controllo del territorio da parte delle élite (Castelnovi, 2017); democratizzare l’accesso a strumenti di analisi spaziale, come i GIS semplificati e le simulazioni idrologiche *open-source* integrate nella piattaforma elaborata per questa ricerca di dottorato, significa restituire questo potere di lettura e pianificazione alla comunità scolastica e, per estensione, alla futura cittadinanza. Utilizzare sistemi aperti non è solo una scelta economica, ma una dichiarazione di intenti: contro la “scatola nera” dei *software* proprietari che nascondono i meccanismi di decisione, la tecnologia *open* educa alla trasparenza dei processi decisionali territoriali.

Il secondo asse di questa proposta teorica riguarda il rapporto con i Beni Culturali e Ambientali. Il titolo stesso della tesi pone l'accento sulla "valorizzazione del Patrimonio Ambientale". Ma cosa significa valorizzare un patrimonio attraverso la realtà aumentata? Non si tratta semplicemente di una fruizione estetica o turistica, del tipo "visita virtuale". La nostra ricerca suggerisce un approccio più profondo: la comprensione della vulnerabilità del patrimonio. I modelli predittivi testati, capaci di integrare dati storici e scenari climatici futuri (come le "bombe d'acqua" simulate nella Streambox), permettono di visualizzare le minacce che incombono sui paesaggi storici e naturali. Vedere la simulazione di una frana che investe un borgo storico modellato nella sabbia, o osservare l'erosione costiera che minaccia un'area protetta, trasforma la percezione del patrimonio: da oggetto statico e musealizzato da contemplare, esso diventa un sistema fragile e vivente da difendere attivamente.

Come evidenziato nel *Corpus degli apprendimenti geografici complessi*, una delle criticità maggiori è la «Dislocazione Causale», ovvero la difficoltà di connettere azioni locali a effetti globali differiti, come nel caso del *Climate Change* (Cfr. Prima Parte del presente lavoro). Le geotecnologie immersive agiscono come protesi cognitive che contraggono il tempo e lo spazio, rendendo visibile l'impatto a lungo termine. Questo genera quella che potremmo definire una "consapevolezza patrimoniale attiva". Gli studenti non imparano solo cos'è un bene ambientale, ma come funziona e perché rischia di scomparire. La comprensione profonda delle fragilità del territorio, mediata dalla tecnologia, spinge a un senso di responsabilità verso il paesaggio; è qui che la Geografia incontra l'Agenda 2030, non come elenco di obiettivi astratti da memorizzare, ma come prassi operativa di analisi della sostenibilità locale.

L'uso delle geotecnologie apre infine un fronte decisivo sull'educazione alla cittadinanza digitale. Viviamo in un'epoca di "disintermediazione" cartografica, dove chiunque può produrre e diffondere mappe. Partecipare a progetti di mappatura collaborativa su piattaforme come OpenStreetMap, come proposto nel nostro modello metodologico, ha un valore

educativo immenso. Gli studenti non si limitano a consultare una mappa, ma mappano il proprio territorio, inserendo edifici, strade o elementi di barriera architettonica; questo esercizio di *neogeography* sviluppa la competenza di osservazione diretta e la responsabilità civica. Integrare i dati raccolti sul campo (tramite *fieldwork*) con la visualizzazione nella Sandbox AR chiude il cerchio tra realtà e rappresentazione. Tuttavia, questo potere porta con sé nuove responsabilità. L'educazione geografica deve farsi carico anche dell'etica del dato; come nota Fini, «la disintermediazione richiede una maggiore attenzione alla qualità e all'affidabilità delle fonti» (Fini, 2012). Insegnare agli studenti a validare i dati che immettono nel sistema, a rispettare la privacy nel rilievo di informazioni sensibili, e a riconoscere i *bias* impliciti in ogni rappresentazione cartografica (anche quella digitale), significa formare cittadini digitali consapevoli, immuni dalla fascinazione acritica per il “dato tecnologico”.

Le implicazioni etiche si estendono alla rappresentazione dell'alterità. Quando simuliamo territori lontani o contesti di crisi nella VR, dobbiamo essere consapevoli che «l'etica “geografica digitale” riguarda l'equità di accesso» e la dignità della rappresentazione (Tesi Dottorato, Parte II). La scelta di sviluppare strumenti *low cost* e replicabili risponde proprio a questo imperativo etico: garantire che l'innovazione non diventi un ulteriore fattore di esclusione sociale, creando scuole di serie A e di serie B, ma sia un bene comune accessibile.

L'integrazione della Sandbox AR con sistemi di GeoAI e GIS (come la StreamBox AR che simula scenari di rischio idrogeologico) permette agli studenti di affrontare problemi autentici legati al loro territorio: a esempio, durante la sperimentazione, gli studenti hanno simulato l'impatto di un'urbanizzazione selvaggia (modellando un'area piana con edifici) sull'allagamento (simulato dalla StreamBox AR). Questo esercizio non era puramente teorico, ma era basato su dati reali del territorio locale (la valle del Potenza, nelle Marche), dove gli allagamenti rappresentano un problema reale.

Attraverso questa simulazione, gli studenti non solo hanno appreso il ciclo idrologico e il concetto di bacino idrografico, ma hanno anche sviluppato una consapevolezza critica dei rischi ambientali e della necessità di pianificazione territoriale consapevole. Alcuni studenti hanno spontaneamente proposto soluzioni alternative all'urbanizzazione selvaggia (ad esempio, la creazione di zone umide per l'assorbimento dell'acqua), dimostrando che la Sandbox AR aveva stimolato il pensiero critico e il *problem-solving*.

Il ruolo della GeoAI in questo contesto è cruciale. La GeoAI, attraverso l'applicazione di algoritmi di machine learning ai dati spaziali, consente di effettuare analisi predittive e di modellazione di scenari in tempo reale (Esri Young Professionals Network Blog, 2025). Il sistema GeoAI integrato nel protocollo GS ha permesso di calcolare e visualizzare la probabilità di esondazione (rischio idrogeologico) in base alla morfologia del terreno creata dagli studenti. Questo ha trasformato l'esperienza manipolativa in una vera e propria simulazione di pianificazione territoriale, fornendo agli studenti uno strumento per valutare l'impatto delle loro decisioni sul paesaggio.

Questo approccio risponde all'esigenza di una Geografia che non sia solo descrittiva, ma trasformativa, in grado di formare cittadini capaci di leggere criticamente il paesaggio e di partecipare in modo informato alle scelte che riguardano l'ambiente. Le geotecnologie immersive, fornendo una rappresentazione dinamica e manipolabile delle conseguenze delle azioni umane, diventano un laboratorio di democrazia spaziale, dove la comprensione del territorio si traduce in responsabilità civica e in un'azione consapevole per la tutela del patrimonio ambientale (Pfeffer et al. 2015).

La Sandbox AR, inoltre, può essere utilizzata per esplorare scenari futuri, ad esempio l'impatto del cambiamento climatico sulla distribuzione della vegetazione o sulla frequenza degli eventi alluvionali. Questo tipo di esercizio, che combina la comprensione dei processi geografici con la riflessione su scenari futuri, è fondamentale per sviluppare una coscienza ambientale e una responsabilità verso le generazioni future.

La ricerca ha tentato di dimostrare che l'apprendimento basato su problemi autentici (*problem-based learning*) è particolarmente efficace nel promuovere la comprensione profonda e il trasferimento della conoscenza ad altri contesti; la Sandbox AR e i suoi upgrade tecnologici, permettendo agli studenti di affrontare problemi geografici autentici, promuove questo tipo di apprendimento profondo (Figura 38 e Figura 39). Il fatto che gli studenti stiano risolvendo problemi legati al loro territorio locale aumenta la rilevanza personale dell'apprendimento, un fattore che è stato dimostrato essere cruciale per la motivazione e l'*engagement*.



Caso Studio: Rischio Idrogeologico Valle del Potenza

Figura 38. Percorso verso la Cittadinanza Attiva (Infografica). Il diagramma illustra il flusso logico descritto nella tesi: dalla comprensione tecnica (nella Sandbox/Streambox AR) alla consapevolezza civile (con dati reali), fino all'azione politica informata. Elaborazione dell'autore.

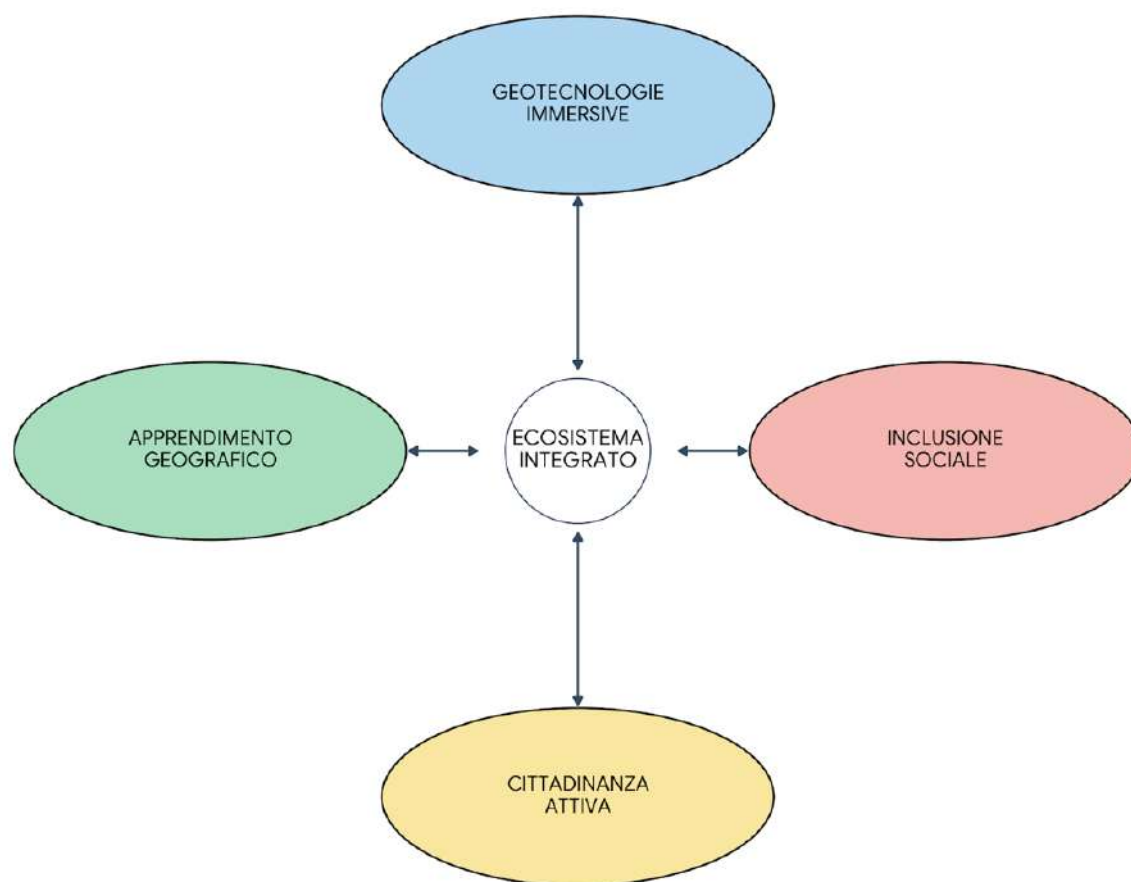


Figura 39. Mappa Concettuale dell'Ecosistema. Visualizza le interconnessioni reciproche tra tecnologia, apprendimento, inclusione e cittadinanza attiva in un sistema integrato. Elaborazione dell'autore.

CONCLUSIONI

Il percorso di ricerca condotto in questo lavoro di dottorato, muovendo dalla rilevazione di una frattura epistemologica e didattica nell'insegnamento della Geografia, ha inteso dimostrare come l'integrazione critica delle geotecnologie immersive, specificamente declinate nei dispositivi Sandbox AR e Streambox AR, non costituisca un mero aggiornamento strumentale, bensì rappresenti una rifondazione paradigmatica delle modalità con cui il sapere spaziale viene costruito, trasmesso ed esperito. L'indagine ha attraversato tre fasi interconnesse – teorica, progettuale e sperimentale – per rispondere alla domanda fondamentale su come sia possibile restituire intelligibilità alla complessità dei sistemi territoriali contemporanei di fronte all'inadeguatezza dei mediatori didattici tradizionali.

In sede conclusiva, emerge con chiarezza come la definizione del *Corpus degli apprendimenti geografici complessi* abbia rappresentato non solo un atto tassonomico, ma una necessaria operazione di svelamento delle barriere cognitive che ostacolano l'alfabetizzazione territoriale. L'identificazione di nodi critici quali la dissonanza tra la tridimensionalità dei fenomeni reali e la bidimensionalità delle rappresentazioni cartografiche, l'invisibilità dei processi fluidi e l'astrazione dei tempi geologici, ha permesso di calibrare l'intervento tecnologico su bisogni epistemici precisi. La ricerca ha evidenziato che la difficoltà degli studenti non risiede in un deficit di astrazione *tout court*, ma nella mancanza di un ponte esperienziale capace di collegare la percezione sensoriale alla concettualizzazione scientifica. In questo senso, la Sandbox AR e la sua evoluzione dinamica, la Streambox AR, si sono rivelate essere molto più che semplici supporti visuali: esse agiscono come vere e proprie "protesi cognitive" che abilitano una forma di *embodied cognition*, in cui il gesto manipolativo diviene il motore primario della comprensione. La mano che plasma la sabbia e osserva la risposta immediata del sistema idrologico simulato non sta semplicemente giocando con un modello, ma sta incorporando le leggi fisiche che governano il territorio, superando quella dislocazione causale che rende così ardua la comprensione dei fenomeni ambientali su vasta scala.

Sul piano tecnologico e metodologico, la scelta radicale di sviluppare architetture hardware e software basate su standard *open source* e *low cost* si è confermata una strategia vincente e necessaria. Contro la logica delle “scatole nere” proprietarie, che trasformano docenti e studenti in utenti passivi di algoritmi opachi, il modello proposto di un ecosistema aperto – integrabile con sensori ambientali, sistemi GIS (QGIS) e moduli di Intelligenza Artificiale – ha restituito alla comunità educante il controllo sui processi di produzione del dato geografico. L’evoluzione dalla staticità topografica della Sandbox alla dinamicità processuale della Streambox AR ha segnato un passaggio decisivo: l’introduzione di simulatori meccatronici per il moto ondoso, le precipitazioni e i flussi fluviali, accoppiati ad analisi predittive in tempo reale, ha permesso di trasformare l’aula in un laboratorio di geomorfologia attiva. Questa transizione ha consentito di affrontare didatticamente non solo la *forma* del territorio, ma il suo *divenire*, introducendo la variabile tempo come elemento tangibile e osservabile. La sostenibilità economica e la replicabilità dei dispositivi progettati, realizzabili con componentistica accessibile e materiali di recupero, rispondono inoltre a un imperativo etico di democratizzazione dell’innovazione, contrastando il rischio che il divario digitale si trasformi in una nuova forma di segregazione formativa tra scuole dotate e scuole periferiche.

Le evidenze empiriche scaturite dalla fase sperimentale, condotta con rigore metodologico attraverso un approccio *mixed methods*, offrono una validazione robusta delle ipotesi di ricerca. I dati quantitativi, che mostrano un incremento significativo nelle performance di apprendimento del gruppo sperimentale rispetto a quello di controllo, con una dimensione dell’effetto statistico eccezionalmente ampia, testimoniano inequivocabilmente la superiorità dell’approccio immersivo nella trasmissione di concetti complessi. Tuttavia, è nell’analisi qualitativa e nelle dinamiche di inclusione che risiede forse il risultato più profondo di questo lavoro. L’osservazione che gli studenti con Bisogni Educativi Speciali (BES) abbiano colmato interamente il gap prestazionale rispetto ai compagni normotipici all’interno del gruppo sperimentale suggerisce che la tecnologia immersiva, attivando canali vicarianti sensoriali, possieda un potenziale equalizzatore formidabile. Laddove il codice linguistico-

simbolico della lezione frontale e del manuale fallisce, l'esperienza aptica e visiva della realtà aumentata tangibile riesce a costruire significato, garantendo un diritto all'apprendimento sostanziale e non solo formale. La Sandbox AR si configura dunque come uno strumento di giustizia epistemica, capace di includere nella costruzione del sapere geografico soggetti tradizionalmente marginalizzati dalle didattiche logocentriche.

Dal punto di vista teorico, la tesi approda alla formalizzazione di un nuovo paradigma: l'Osservazione Geografica Immersiva (OGI). Questa modalità non si pone in antitesi alle tradizionali osservazioni diretta (il *fieldwork*) e indiretta (la cartografia), ma si inserisce dialetticamente tra esse come un "terzo spazio" di mediazione. Se l'osservazione diretta è immersa nel reale ma limitata dalla scala umana, e quella indiretta è potente nell'astrazione ma disincarnata, l'OGI permette di manipolare lo spazio e il tempo mantenendo un ancoraggio sensoriale. Essa consente di operare quella "compressione temporale" necessaria per visualizzare i processi lenti della geologia e quella "sinossi spaziale" indispensabile per comprendere le interconnessioni sistemiche. La ricerca suggerisce che il ciclo didattico più efficace non sia quello sostitutivo, ma quello integrato, in cui l'immersione simulata funge da *primer* cognitivo per l'analisi cartografica e da palestra preparatoria per l'esperienza sul campo. In questo quadro, l'integrazione con i sistemi di GeoAI, che proiettano scenari di rischio futuri sulla morfologia modellata dagli studenti, eleva l'osservazione da atto descrittivo a strumento prognostico e pianificatorio.

Le implicazioni di questo studio travalicano i confini della didattica disciplinare per investire la sfera dell'educazione alla cittadinanza e della responsabilità ambientale. In un'epoca segnata dall'Antropocene e dall'urgenza climatica, la geografia non può limitarsi a nominare i luoghi, ma deve fornire gli strumenti per comprenderne la vulnerabilità. La possibilità offerta dalla Streambox AR di simulare scenari di rischio idrogeologico o sismico su territori reali, visualizzando le conseguenze di scelte urbanistiche incaute, trasforma lo studente in un decisore politico *in nuce*. L'esperienza diretta della connessione sistemica – per cui un

intervento a monte produce effetti a valle – fonda una nuova etica della responsabilità territoriale, basata non su imperativi morali astratti ma sulla comprensione scientifica delle interdipendenze. Le geotecnologie immersive si rivelano così potenti alleati per la valorizzazione critica del Patrimonio Ambientale, trasformando la percezione del paesaggio da sfondo estetico a sistema vivente e fragile da custodire.

Non si possono tuttavia tacere le criticità e le sfide future che questo lavoro lascia aperte. Il “realismo convincente” delle simulazioni impone una vigilanza pedagogica costante per evitare la reificazione del modello e la confusione tra probabilità algoritmica e verità fenomenica. Inoltre, la persistenza di barriere logistiche e la necessità di una formazione docente specifica e continua rappresentano ostacoli reali alla diffusione capillare di queste pratiche. La ricerca futura dovrà necessariamente indagare la longitudinalità degli apprendimenti acquisiti tramite OGI, verificando se la competenza profonda maturata con la Sandbox si traduca stabilmente in una capacità di lettura del paesaggio reale nel lungo periodo.

In definitiva, questo lavoro consegna alla comunità scientifica ed educativa non solo un set di strumenti tecnologici validati, ma una prospettiva pedagogica rinnovata. Una geografia “aumentata” che, ibridando atomi e bit, mano e mente, restituisce centralità all’esperienza corporea nella costruzione della conoscenza. La sfida raccolta e rilanciata è quella di formare una generazione di “osservatori aumentati”, cittadini dotati della sensibilità e degli strumenti cognitivi necessari per decodificare la complessità del mondo contemporaneo e per agire in esso con consapevolezza, competenza e cura.

BIBLIOGRAFIA

- **Adel, A.** (2020). Utilizing technologies of fog computing in educational IoT systems: Privacy, security, and agility perspective. *Journal of Big Data*, 7(99), 1-19.
- **Alex, G., Hily, A.** (2024). Acceptability of immersive sketching and prototyping tool: VR-sketcher case study. *ICE IEEE/ITMC Conference*, 1-7.
- **Al-Somali, S.** (2023). Exploring academics' perspectives related to the adoption of augmented reality applications within an e-learning environment in higher education institutions. *Proceedings of the International Conference on Modern Research in Education, Teaching and Learning*, 1(1), 33-45.
- **Ananiadou, K., Claro, M.** (2009). *21st Century Skills and Competences for New Millennium Learners in OECD Countries*. OECD Education Working Papers, No. 41. OECD Publishing.
- **Arymbekov, B., Turekhanova, K., Turdalyuly, M.** (2024). The effect of augmented reality (AR) supported teaching activities on academic success and motivation to learn nuclear physics among high school pupils. *International Journal of Information and Education Technology*, 14(5), 743.
- **Banini, T.** (2019). *Geografie Culturali*. Milano: FrancoAngeli.
- **Barakat, N. H.** (2019). A framework for integrating software design patterns with game design framework. In *Proceedings of the 8th International Conference on Software and Information Engineering*, pp. 47-40.
- **Bärthele, R., Sauer, S., Wilkening, J.** (2023). Exploring the potential of an Augmented Reality sandbox for geovisualization. In *Proceedings of the ICA* (Vol. 5, p. 1). Göttingen, Germany: Copernicus Publications.
- **Basílio E. F., Oliveira D. N. D. S., Robelo M. V. M., Ribeiro L. T. F., Lima C. R. F., Sampaio P. S. L., Guimarães M. D.** (2020). Digital information and

communication technologies (TDIC) in an interdisciplinary perspective in teaching geography: A socio-spatial analysis of Limoeiro do Norte-Ceará.

- **Bauman, Z.** (2011). *Modernità liquida*. Bari: Laterza.
- **Bernardi R.** (1990). *Dalla geografia nozionistica alla geografia scientifica applicata. La scuola verso i problemi del territorio e della società*. Bologna: Pàtron.
- **Bernardi R.** (2002). *Voglia di geografia. Conoscere, Capire, Gestire*. Verona: Libreria Editrice Universitaria.
- **Bernardi R., Poli, E.** (2011). *Equilibri dinamici di una realtà complessa*. Cagliari: Cuec Edizioni Universitarie.
- **Betti S., Rocca G.** (2012). Il sapere geografico tra ricerca e didattica. In *Rivista Geografica italiana*, anno CXIX, Fasc. 1° marzo 2012, pp. 101-102.
- **Betti S., Fratini F.** (2017). Geografia laboratoriale per la “formazione primaria”. *Italian Journal of Educational Research*, pp. 141-150.
- **Betti, S., Borghi, D., Virgini, L.** (2023). SandBox Augmentation Reality (AR): Geotecnologie per una didattica della Geografia tra inclusione e integrazione. *Memorie della Società Geografica Italiana*, Vol. XXII.
- **Betti, S., Borghi, D., Virgini, L.** (2025). SandBox AR e StreamBox AR: nuovi orizzonti tecnologici per la didattica laboratoriale della geografia. In *Atti del Convegno “La Geografia per l’insegnamento della geografia”*.
- **Bettoni, G.** (2022). Geografia e didattica. In A. M. Pioletti, D. Di Tommaso, E. Meynet (A cura di), *L’insegnamento attuale della geografia. Le linee generali e il contesto bilingue valdostano* (pp. 29-37). Milano: FrancoAngeli.
- **Bignante, E.** (2011). *Geografia e ricerca visuale*. Bari: Laterza.
- **Bignante, E., Celata, F., Vanolo, A.** (2023). *Geografie dello sviluppo. Una prospettiva critica e globale*. Torino: UTET.

- **Bordogna, B., Psaila, G.** (2008). Customizable flexible querying in classical relational databases. In *Handbook of Research on Fuzzy Information Processing in Databases* (pp. 191-217). IGI Global.
- **Borettaz, O., Meynet, E.** (2022). Cordela: strumenti digitali per l'insegnamento della geografia, della Biblioteca regionale Salvadori di Aosta. In A. M. Pioletti, D. Di Tommaso, E. Meynet (A cura di), *L'insegnamento attuale della geografia. Le linee generali e il contesto bilingue valdostano* (pp. 72-82). Milano: FrancoAngeli.
- **Brooke, J.** (1996). SUS: A 'quick and dirty' usability scale. In *Usability Evaluation in Industry* (pp. 189-194). London: Taylor & Francis.
- **Bujdosó G., Jász E., Császár Z. M., Farsang A., Kapusi J., Molnár E., Teperics K.** (2019). Virtual reality in teaching geography. In *ICERI2019 Proceedings* (pp. 659-665). IATED.
- **Buonora, L.** (2024). Valutazione dell'affidabilità delle stime di precipitazione fornite da dataset satellitari per il territorio italiano.
- **Calvani, A.** (2014). *Come fare una lezione efficace*. Roma: Carocci.
- **Capuano A., Caprino V., Impellizzeri Laino L., Sakellariou A.** (A cura di). (2023). *Il paesaggio come unione tra arte e scienza. L'eredità di Alexander von Humboldt e Ernst Haeckel*. Macerata: Quodlibet.
- **Caquard, S.** (2013). Cartography I: Mapping narrative cartography. *Progress in Human Geography*, 37(1), 135-144.
- **Carbonell-Carrera, C., Bermejo-Asensio, L. A.** (2017). Landscape interpretation with augmented reality and 3D geospatial technologies. *Journal of Geography in Higher Education*, 41(4), 630-643.
- **Caruso, A., Medina, N., Zanolin, G.** (2018). Verso una geografia per l'inclusione: proposte didattiche tra teorie, pratiche e sperimentazioni. *Tratti geografici. Materiali di ricerca e risorse educative*, 5, 19-37.

- **Castelnovi, M.** (2017). Geografia da insegnare o da apprendere. Riflettendo sulle opere di Matteo Ricci e Martino Martini. *Bollettino della Società Geografica Italiana*, XIII(X), 413-422.
- **Castells, M.** (2014). *La nascita della società in rete*. Milano: EGEA.
- **Casti, E.** (2008). *Cartografia e progettazione territoriale. Dalle carte coloniali alle carte partecipative*. Milano: UTET.
- **Casti, E.** (2020). *Cartografia critica. Dal topos alla chora*. Milano: GoWare e Guerini Associati.
- **Castoldi, M., Claris, S., Magni, F., Previtali, D., Rucci, A.** (2025). *Guida alle Nuove Indicazioni. Proposte per la scuola secondaria*. Brescia: La Scuola.
- **Chang, C. H., Wu, B. S.** (2018). Teaching geography with technology – a critical commentary. In *Learning geography beyond the traditional classroom: Examples from Peninsular Southeast Asia* (pp. 35-47). Singapore: Springer Singapore.
- **Chiappini, G., Delfino, M., Gibelli, C., Lombardo, M., Urgeghe, S., Villani, P.** (2014). Tecnologia e innovazione didattica. Storia trentennale di un percorso didattico di geografia quantitativa. *Italian Journal of Educational Technology*, 22(1), 21-30.
- **Christmann, O., Christmann, O., Fleury, S., Migaud, J., Raimbault, V., Pousard, B., Gutter, T., Richir, S.** (2022). Visualizing the invisible: User-centered design of a system for the visualization of flows and concentrations of particles in the air. *Information Visualization*, 21(3), 311-320.
- **Claval, P., Retailé, D.** (1995). Géographie culturelle. In *L'information géographique*, 61(1).
- **Clusit.** (2024). *Rapporto 2024 sulla sicurezza ICT in Italia*. Associazione Italiana per la Sicurezza Informatica.
- **Cohen, L., Manion, L., Morrison, K.** (2018). *Research Methods in Education* (8th ed.). Routledge.

- **Cohen, J.** (2013). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- **Çöltekin, A., Lochhead, I., Ery, M., et al.** (2020). Extended Reality in Spatial Sciences: A Review of Research Challenges and Future Directions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(7), 439.
- **Commissione Europea.** (2023). *Digital Economy and Society Index (DESI) 2023: Italy*. Brussels: European Commission.
- **Conti, S., Dematteis, G., Lanza, C., Nano, F.** (1991). *Geografia Dell'economia Mondiale*. Torino: UTET.
- **Cosgrove, D.** (1998). *Social Formation and Symbolic Landscape*. London: Croom Helm.
- **Cosgrove, D.** (1990). *Realtà sociali e paesaggio simbolico*. Milano: Unicopli.
- **Côté, M. A., Kádár, A., Yuan, X., Kybartas, B., Barnes, T., Fine, E., Trischler, A.** (2018). Textworld: A learning environment for text-based games. In *Workshop on Computer Games* (pp. 41-75). Cham: Springer International Publishing.
- **Crampton, J. W.** (2009). Cartography: maps 2.0. *Progress in Human Geography*, 33(1), 91–100.
- **Creswell, J. W.** (2014). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. SAGE Publications.
- **Creswell, J. W., Plano Clark, V. L.** (2017). *Designing and Conducting Mixed Methods Research* (3rd ed.). SAGE Publications.
- **De Filpo M., Grippo E.** (2023). I plastici nella storia (della didattica) della geografia: da strumenti analogici a elaborazioni grafiche 3D. In *Geografia e tecnologia: transizioni, trasformazioni, rappresentazioni*. (pp. 641-650).
- **Dalim, C. S. C., Kolivand, H., Kadhim, H., Sunar, M. S., Billinghamurst, M.** (2017). Factors influencing the acceptance of augmented reality in education: A

review. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 7(5), 1518–1528.

- **De la Varga, M., Schaaf, A., Wellmann, F.** (2019). GemPy 1.0: Open-source stochastic geological modeling and inversion. *Geoscientific Model Development*, 12(1), 1–32.
- **De Spuches, G.** (2021). Per una didattica della geografia sociale: sopralluoghi ed esplorazioni urbane. *Geography Notebooks / Quaderni di Geografia*, 4(2), 55-64.
- **De Vecchis, G.** (2011). *Didattica della geografia. Teoria e prassi*. Torino: UTET Università.
- **De Vecchis G., Palagiano, C.** (2021). *Le parole chiave della geografia*. Roma: Carocci Editore
- **De Vecchis, G., Pasquinelli d'Allegra, D., Pesaresi, C.** (2020). *Didattica della Geografia*. Torino: UTET Università.
- **De Vecchis, G., Pesaresi, C.** (2024). *Dalla carta geografica alla mappa digitale. Percorsi didattici ed esempi applicativi* (pp. 1-141). Carocci.
- **Dematteis, G.** (1985). *Le metafore della Terra. La Geografia Umana tra mito e scienza*. Milano: Feltrinelli.
- **Dematteis, G.** (2015). *Le metafore della Terra. La geografia umana tra mito e scienza*. Milano: Feltrinelli.
- **Dematteis, G., Ferlino, F.** (A cura di). (2003). *Il mondo e i luoghi: Geografie delle identità e del cambiamento*. IRES Piemonte.
- **Dematteis, G., Giorda, C.** (2013). Territorial values and geographical education. *J-READING Journal of Research and Didactics in Geography*, 1.
- **Dessen Jankell, L., Sandahl, J., Örbring, D.** (2021). Organising concepts in geography education: a model. *Geography*, 106(2), 66-75.
- **Di Gioia A.** (2023). Metodologie sistemiche per l'Human Learning nella didattica della Geografia: dagli strumenti GIS alla Realtà Aumentata. In *Geografia e*

tecnologia: transizioni, trasformazioni, rappresentazioni (Vol. 22, pp. 661-670). Società di Studi Geografici.

- **Di Gioia A.** (2024). La Geografia nella Realtà Aumentata delle Virtual Sandbox. *Ambiente Società Territorio*, 69(3), 24-28.
- **Di Gioia A.** (2025). *La Geografia Emozionale per la comunità*. Roma: Carrocci Editore.
- **Doering, A., Koseoglu, S., Scharber, C., Henrickson, J., Lanegran, D.** (2014). Technology integration in K–12 geography education using TPACK as a conceptual model. In *Journal of geography*, 113(6), 223-237.
- **Erickson.** (2025). *Geografia: cosa cambia con le Nuove Indicazioni nazionali 2025?*. Trento: Edizioni Centro Studi Erickson.
- **Esri Young Professionals Network Blog.** (2025). *The Emerging Field of GeoAI: What to Know and Why*. <https://tinyurl.com/47zs82se> (consultato il 05/01/2026)
- **Estes, M. H., Hortas, M. J., Mendes, L.** (2018). Fieldwork in geography education: An experience in initial teacher training program. *Didáctica Geográfica*, 77-101.
- **European Commission** (2020). *Digital Education Action Plan 2021-2027: Resetting education and training for the digital age*.
- **European Commission/EACEA/Eurydice** (2019). *Digital education at school in Europe*. Publications Office of the European Union.
- **Farinelli, F.** (2009). *I segni del mondo. Immagine cartografica e discorso geografico in età moderna*. Firenze: La Nuova Italia.
- **Farinelli, F.** (2003). *Geografia. Un'introduzione ai modelli del mondo*. Torino: Einaudi.
- **Farné, R., Agostini, F.** (2014). *Outdoor education. L'educazione si-cura all'aperto*. Parma: Junior.

- **Faticenti, F.** (2023). Una Geografia per la sostenibilità. Il quadro epistemologico disciplinare, le Indicazioni nazionali, la prassi didattica nella Scuola primaria. *Annali online della Didattica e della Formazione Docente*, 15(25), 126-140.
- **Faticenti, F.** (2025). Teaching and learning Geography in Italian First Cycle of Education. *J-READING (Journal of Research and Didactics in Geography)*, 1-15.
- **Fini, A.** (2012). Risorse educative aperte. Principali orientamenti e prospettive di sviluppo. In *Innovascuola - AMELIS* (pp. 17-42).
- **Frémont, A., Milanesi, M., Quaini, M.** (1990). *La regione: uno spazio per vivere*. Milano: FrancoAngeli.
- **Gagliardo, P., Ronconi, M. L., Vocaturo, S.** (2002). Geografia e innovazione. *Geotema*, 17, 16-21
- **Gallinelli, D., Malatesta, S.** (2018). *Corpi, strumenti, narrazioni: Officine didattiche per una geografia inclusiva*. FrancoAngeli.
- **Gambi, L.** (1964). *Questioni di geografia*. Torino: Einaudi.
- **Garante per la Protezione dei Dati Personali.** (2023). *La scuola a prova di privacy. Vademecum*. Roma: GPDP.
- **Gardner, H.** (2011). *The Unschooled Mind: How Children Think and How Schools Should Teach*. New York: Basic Books.
- **Gavinelli, D., Gilardi, T.** (2022). Insegnare geografia oggi: Ambiente, territorio e paesaggio tra teorie, scritture e pratiche. *Tratti Geografici. Materiali Di Ricerca E Risorse Educative*, 14-28.
- **Giarolli, S.** (2023). *Geografia attiva per la scuola primaria: percorsi esperienziali per esplorare luoghi, spazi e culture*. Trento: Centro Studi Erikson.
- **Giorda, C.** (2017). Il ruolo dell'educazione geografica nella riduzione delle disuguaglianze economiche e sociali. In *Geografia per l'inclusione Partecipazione attiva contro le disuguaglianze*. (pp. 46-55). FrancoAngeli.

- **Giorda, C.** (2014). *Il mio spazio nel mondo. Geografia per la scuola dell'infanzia e primaria*. Roma: Carocci.
- **Giorda, C., Puttilli, M.** (2019). Educazione al territorio: una metodologia per la formazione geografica. In *Idee geografiche per educare al mondo* (pp. 19-35). FrancoAngeli.
- **Giorda, C., Puttilli, M.** (2021). *Educare al territorio, educare il territorio. Geografia per la formazione*. Roma: Carocci.
- **Giorda, C., Rosmo, C.** (2021). Il ruolo dell'ambiente nell'apprendimento. L'educazione geografica fra neuroscienze, place-based e outdoor education. *Ambiente Società Territorio*, 15-21.
- **Giorda, C., Zanolin, G.** (2020). *Idee geografiche per educare al mondo* (p. 168). Milano: FrancoAngeli.
- **Giunti Scuola** (2025). *La geografia secondo le nuove indicazioni*.
- **Golledge R., Marsh M., Battersby S.** (2008). A Conceptual Framework for Facilitating Geospatial Thinking. In *Annals of the Association of American Geographers*, 98(2), 285-308.
- **Goodchild, M. F.** (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69(4), 211-221.
- **Governa, F., Memoli, M.** (A cura di). (2011). *Geografie dell'urbano. Spazi, politiche, pratiche della città*. Roma: Carocci.
- **Greiner, A. L., Dematteis, G., Lanza, C.** (a cura di Vanolo A.) (2016). *Geografia umana. Un approccio visuale*. Torino: UTET.
- **Grillotti Di Giacomo, M. G.** (2000). Epistemologia geografica come progetto cosmopolita. *Bollettino della Società Geografica Italiana*, XII(V), 895-908.
- **Gryl, I., Jekel, T.** (2012). Re-centring geoinformation: Spatial citizenship. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization*, 47(1), 18-28.

- **Guarrasi, V.** (2006). L'indagine sul terreno e l'arte del sopralluogo. In M. Marengo (A cura di), *La dimensione locale. Esperienze (multidisciplinari) di ricerca e questioni metodologiche*. Roma: Aracne.
- **Haraway D.** (1988). Situated knowledges: The science question in feminism and the privilege of partial perspective. In *Feminist Studies*, 14(3), 575–599.
- **Harvey, D.** (2019). *Spaces of Global Capitalism: A Theory of Uneven Geographical Development*. Verso Books.
- **Harvey, D.** (2009). *Social Justice and the City*. University Georgia Press.
- **Hattie, J.** (2009). *Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement*. London: Routledge.
- **Hazen H. D., Alberts H. C.** (2020). Innovative approaches to teaching in geography. *The Geography Teacher*, 18(1), 1-2.
- **Healey, R. L.** (2012). The power of debate: Reflections on their potential for geography in higher education. *Journal of Geography in Higher Education*, 36(2), 239–257.
- **Hickman, C., Marks, E., Pihkala, P., Clayton, S., Lewandowski, R. E., Mayall, E. E., Van Susteren, L.** (2021). Climate anxiety in children and young people and their beliefs about government responses to climate change: a global survey. *The Lancet Planetary Health*, 5(12), e863-e873.
- **Huh, S., Jo, I.** (2023). Successes and struggles: evaluating geospatial technologies integration in geography lessons using TPACK. In *Journal of Geography*, 122(5), 126-139.
- **International Geographical Union Commission on Geographical Education (IGU).** (2016). *2016 International Charter on Geographical Education*. <http://www.igu-cge.org/charters.htm>

- **INDIRE.** (2023). *Avanguardie Educative. Linee guida per l'implementazione degli spazi educativi.*
- **International Organization for Standardization.** (2019). *Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems* (ISO 9241-210:2019). Geneva: ISO.
- **ISTAT.** (2023). *Cittadini, imprese e ICT: Anno 2023.* Roma: Istituto Nazionale di Statistica.
- **Janowicz, K., Gao, S., McKenzie, G., Hu, Y., Bhaduri, B.** (2020). GeoAI: spatially explicit artificial intelligence techniques for geographic knowledge discovery and beyond. *International Journal of Geographical Information Science*, 34(4), 625-636.
- **Johnston, R. J.** (1981). The dictionary of human geography. In *The dictionary of human geography*. Basil Blackwell.
- **Kaminske, V.** (1997). Geographical concepts: Their complexity and their grading. In *International Research in Geographical and Environmental Education*, 6(1), 4-26.
- **Kantajai, V.** (2022). The community-based institutional administration model to promote students career skills in Chiang Mai education sandbox, Thailand. *Higher Education Studies*, 12(4), 66.
- **Kerski, J. J.** (2008). The role of GIS in Digital Earth education. *International Journal of Digital Earth*, 1(4), 327-345.
- **Kerski, J. J.** (2015). Geo-awareness, geo-enablement, geo-technologies, citizen science, and storytelling: Geography on the world stage. *Geography Compass*, 9(1), 14-26.
- **Kerski, J. J.** (2020). *Interpreting Our World: 100 Discoveries That Revolutionized Geography.* Bloomsbury Publishing USA.

- **Kerski, J. J.** (2023). Teaching and learning geography with a web GIS approach. In *Re-visioning Geography: Supporting the SDGs in the post-COVID era* (pp. 113-135). Cham: Springer International Publishing.
- **Kitchin, R.** (2011). The programmable city. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 38(6), 945-951.
- **Kitchin, R.** (2014). *The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infrastructures and Their Consequences*. London: Sage.
- **Kolb, D. A.** (2014). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. FT Press.
- **Krawczyk, C. M., Buddensiek, M. L., Oncken, O., Kukowski, N.** (2013). Seismic imaging of sandbox experiments - laboratory hardware setup and first reflection seismic sections. *Solid Earth*, 4, 93-104.
- **Ladeira F. F.** (2022). The application of Digital Information and Communication Technologies (DICTs) in Geography teaching: beyond instrumental visions. *Ensino em Re-Vista*, 29.
- **Lake, T., Tessler, J.** (2019). Augmented Reality Sandbox: Building and implementation for STEM education. *Journal of Technology Education*, 30(2).
- **Lakoff, G., Johnson, M.** (1980). *Metaphors We Live By*. University of Chicago Press.
- **Langener, S., Klaassen, R., VanDerNagel, J., Heylen, D.** (2022). Immersive virtual reality avatars for embodiment illusions in people with mild to borderline intellectual disability. *JMIR Serious Games*, 10(4).
- **La Foresta, D.** (2025). Territori digitali e nuove progettualità educative per l'insegnamento della geografia. *Tratti Geografici*, FrancoAngeli
- **Lee J., Cimová T., Foster E. J., France D., Krajňáková L., Moorman L., Zhang, J.** (2025). Transforming geography education: the role of generative AI in

- curriculum, pedagogy, assessment, and fieldwork. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 1-17.
- **Lei, C., Kang, Y., Han, Z., Li, X., Liu, C., Liu, X., Liu, G.** (2023). A user-centered interactive optimization approach based on immersive virtual reality. In *Building Simulation 2023*(Vol. 18, pp. 458-465). IBPSA.
 - **Li, Q.** (2024). From virtual to reality: How VR, AR, XR, MR are reshaping our lives and work. *International Journal of Education and Humanities*, 15(3), 55.
 - **Lillquist, K. D.** (2002). Stream Tables and Watershed Geomorphology Education. *Journal of Geography*, 101(5), 195-201.
 - **Livingstone, D. N.** (1992). *The Geographical Tradition: Episodes in the History of a Contested Enterprise*. Oxford: Blackwell.
 - **Lynch, K.** (1960). *The Image of the City*. Cambridge MA: MIT Press.
 - **Lucidi L., Pesaresi C.** (2023). Metodologie didattiche attive e Story Map per un apprendimento autentico Active didactic methodologies and Story Maps for authentic learning. *Cartographic Association*, (177), 126.
 - **Luzzi D., Scippo S., Cuomo S., Ranieri M.** (2024). Affordance pedagogiche della Realtà Estesa nell'educazione al territorio: Una revisione della letteratura. *Ricerche di Pedagogia e Didattica*, 1-20.
 - **Meyer, J. H. F., Land, R.** (2003). *Threshold concepts and troublesome knowledge: Linkages to ways of thinking and practising within the disciplines* (Occasional Report 4). ETL Project, Universities of Edinburgh, Coventry, and Durham.
 - **Migliaccio F., Carrion D.** (2019). *Sistemi informativi territoriali. Principi e applicazioni*. Torino: UTET Università.
 - **Magnaghi, A.** (2001). Una metodologia analitica per la progettazione identitaria del territorio. In *Rappresentare i luoghi. Metodi e tecniche*. Firenze: Alinea.

- **Mai, G., Janowicz, K., Hu, Y., Gao, S., Yan, B., Zhu, R., Lao, N.** (2022). A review of location encoding for GeoAI: methods and applications. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(4), 639-673.
- **Mason, L.** (2006). *Psicologia dell'apprendimento e dell'istruzione*. Bologna: Il Mulino.
- **Mastronunzio, M., Martellozzo, F.** (2007). L'utilizzo della cartografia nella didattica della geografia: la rappresentazione delle regioni alla scala nazionale. *Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia*, 129-131, 1-10.
- **Mayer, R. E.** (2009). *Multimedia learning* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- **Meadows, D. H.** (2008). *Thinking in Systems: A Primer*. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing.
- **MIM.** (2024). *Linee guida per l'insegnamento dell'educazione civica* (Decreto Ministeriale n. 183 del 7 settembre 2024). Roma: Ministero dell'Istruzione e del Merito.
- **Minca, C.** (2001). *Introduzione alla geografia postmoderna*. Padova: CEDAM.
- **Minca, C.** (2022). *Appunti di Geografia*. Milano: Wolters Kluwer.
- **Minca C., Colombino A.** (2012). *Breve manuale di geografia umana*. Padova: CEDAM.
- **Ministero dell'Istruzione.** (2022). *Piano Scuola 4.0*. D.M. 161/2022.
- **Mishra, P., Koehler, M. J.** (2006). Technological Pedagogical Content Knowledge: A framework for teacher knowledge. *Teachers College Record*, 108(6), 1017-1054.
- **MIUR.** (2012). *Indicazioni nazionali per il curricolo della scuola dell'infanzia e del primo ciclo d'istruzione*. Roma: Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca.
- **MIUR.** (2018). *Indicazioni nazionali e nuovi scenari*. Roma: Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca.
- **Morin, E.** (1993). *Introduzione al pensiero complesso. Gli strumenti per affrontare la sfida della complessità*. Milano: Sperling & Kupfer.

- **Morri, R.** (2021). Per una cultura diffusa della geografia. In Giudici S., Macchi P., (a cura di), *Dialoghi intorno alle geografie. Esperienze, linguaggi, narrazioni dal Festival delle geografie di Levanto*, 71-81.
- **Morri, R., Pavia, D., Pesaresi, C.** (2023). Geotecnologie ed educazione geografica. In *Geografia e tecnologia: transizioni, trasformazioni, rappresentazioni* (pp. 637-640). Roma: Nuova Cultura.
- **Morton, T.** (2013). *Hyperobjects: Philosophy and Ecology after the End of the World*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- **Mutis, I., Antonenko, P.** (2022). Unmanned aerial vehicles as educational technology systems in construction engineering education. *Journal of Information Technology in Construction*, 27, 273-289.
- **Neri, E., Malatesta, S.** (2022). Geographical education and visual: lessons from the past A brief comment to Cristiano Giorda's L'immagine del mondo nella geografia dei bambini (F. Angeli 2021). *J-READING Journal of Research and Didactics in Geography*, 1.
- **Nex, F., Remondino, F.** (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15.
- **National Research Council (NRC).** (2006). *Learning to think spatially: GIS as a support system in the K-12 curriculum*. The National Academies Press
- **Nuove Indicazioni Nazionali 2025 della scuola dell'Infanzia e Primo Ciclo d'Istruzione.** (2025). Materiali per il Dibattito Pubblico.
- **Nye, B. D.** (2015). Intelligent tutoring systems by and for the developing world: A review of trends and approaches for educational technology in a global context. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 25, 177-203.

- **Oberdörfer, S., Birnstiel, S., Erich, M., Grafe, S.** (2021). Mutual benefits: Interdisciplinary education of pre-service teachers and HCI students in VR/AR learning environment design. *Frontiers in Education*, 6.
- **OECD** (2020). *TALIS 2018 Results (Volume II): Teachers and School Leaders as Valued Professionals*. OECD Publishing.
- **OECD** (2023). *OECD Digital Education Outlook 2023: Towards an Effective Digital Education Ecosystem*. OECD Publishing.
- **Ojala, M.** (2012). How do children cope with global climate change? Coping strategies, engagement, and well-being. *Journal of Environmental Psychology*, 32(3), 225-233.
- **Panjaitan B. R., Ningrum E., Waluya B.** (2023). Digital learning tools in geography education: A systematic literature review. *The Eurasia Proceedings of Educational and Social Sciences*, 33, 135-143.
- **Pasquinelli d'Allegra, D.** (2022). *La geografia dell'Italia. Identità, paesaggi, regioni*. Roma: Carocci.
- **Pavia, D., Pasquinelli D'Allegra, D., Pesaresi, C.** (2017). *Geografia per l'inclusione: Partecipazione attiva contro le disuguaglianze*. FrancoAngeli.
- **Pavlova, O., Bashta, A., Kovtoniuk, M.** (2023). Augmented Reality based information technology for objects 3D models visualization. *Computer Systems and Information Technologies*, 1, 68.
- **Pesaresi, C.** (2007). Punti di contatto tra informatica e geografia: approcci e nuovi orizzonti didattici per la scuola. *Semestrale di studi e ricerche di geografia*, (1).
- **Pesaresi, C.** (2016). Le geotecnologie per una didattica costruttivista-interdisciplinare e per un approccio cooperativo. In *Insegnare geografia. Teoria, metodi e pratiche* (pp. 113-133). UTET, De Agostini.
- **Pesaresi C.** (2017). *Applicazioni GIS. Principi, metodologie, linee di ricerca*. Torino: UTET Università.

- **Petrasova, A., Harmon, B., Petras, V., Tabrizian, P., Mitsova, H.** (2018). *Tangible Modeling with Open Source GIS*. Springer.
- **Pfeffer, K., Martinez, J., O'Sullivan, D., Scott, D.** (2015). Geo-technologies for spatial knowledge: Challenges for inclusive and sustainable urban development. In *Geographies of Urban Development* (pp. 145-162). Springer.
- **Piano Nazionale Scuola Digitale (PNSD)**, (2022)., Missione 4 - Istruzione e Ricerca, Componente 1 - Potenziamento dell'offerta dei servizi di istruzione: dagli asili nido alle università.
- **Pioletti, A. M., Di Tommaso, D., Meynet, E.** (A cura di). (2022). *L'insegnamento attuale della geografia. Le linee generali e il contesto bilingue valdostano*. Milano: FrancoAngeli.
- **Poli E.** (2011-a). La geografia e il suo insegnamento: riflessioni e analisi. *Ambiente, Società e territorio – Geografia nelle scuole*, vol. 2, marzo-aprile.
- **Poli E.** (2011-b). Per un approccio didattico in geografia: il «progetto» implicito della carta. *Bollettino dell'Associazione Italiana di Cartografia, AIC*, vol. 1.
- **Poli E.** (2011-c). Un quadro epistemologico sulla dimensione della geografia. *Geografia*, voll. 3-4, luglio-dicembre.
- **Pollice, F.** (2022). Placetelling. Per un approccio geografico applicativo alla narrazione dei luoghi. *Geotema*, 68, 5-13.
- **Pollice, F., Rinella, A., Epifani, F., Miggiano, P.** (2020). Placetelling as a Strategic Tool for Promoting Niche Tourism to Islands: The Case of Cape Verde. *Sustainability*, 12(10), 4333.
- **Prezioso, M.** (2017). L'educazione geografica per l'inclusione. *TRATTI GEOGRAFICI. Materiali Di Ricerca E Risorse Educative*, 32-45.
- **Prunesti, A., Casagrande, G.** (2012). Geografia sociale, comunicazione geolocalizzata e realtà aumentata. In *Geografia Sociale e Democrazia* (pp. 105-119). Aracne.

- **Puttilli, M., Santangelo, M.** (2018). Geografia ed emozioni. Andamenti carsici nel dibattito italiano e internazionale. *Rivista geografica italiana*, 125(3), 227-242.
- **Quintero, J., Baldiris, S., Rubira, R., Cerón, J., Vélez, G.** (2019). Augmented reality in educational inclusion. A view from the sandbox. *Journal of Universal Computer Science*, 25(11), 1542–1564.
- **Raffestin, C.** (2022). *Per una geografia del potere*. Milano: Unicopli.
- **Redecker, C.** (2017). *European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu*. Punie, Y. (ed). EUR 28775 EN. Publications Office of the European Union.
- **Reed, S. E., Kreylos, O., Hsi, S., Kellogg, L. H.** (2016). Shaping Watersheds Exhibit: An Interactive, Augmented Reality Sandbox for Advancing Earth Science Education. In *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting Abstracts*, ED34A-01.
- **Restrepo Rodriguez, A. O., Casas Mateus, D. E., Gaona Garcia, P. A., Gomez Acosta, A., Montenegro Marin, C. E.** (2019). Segmentation methods for image classification using a convolutional neural network on AR-Sandbox. In *IFIP International Conference on Artificial Intelligence Applications and Innovations* (pp. 391-398). Cham: Springer International Publishing.
- **Rocca, L., Gasparini, E.** (2022). So-stare nelle pratiche geografiche. Il diario di bordo nella didattica della geografia. In *Didattiche disciplinari* (pp. 473-486).
- **Roo, J. S., Gervais, R., Frey, J., Hachet, M.** (2017). Inner garden: Connecting inner states to a mixed reality sandbox for mindfulness. *CHI '17 - International Conference of Human-Computer Interaction*.
- **Rose, D. H., Meyer, A.** (2002). *Teaching Every Student in the Digital Age: Universal Design for Learning*. ASCD.

- **Rossi, M.** (2022). Rossi, M. (2022). Realtà virtuale aumentata per la promozione di una didattica inclusiva. *Quality learning: prospettive per una didattica efficace*. Progedit.
- **Sarno E., Siniscalchi S.** (2008). Ricerca-didattica in geografia e formazione dei docenti: primi risultati da un'indagine statistica. *Terre di mezzo: la Basilicata tra costruzione regionale e proiezioni esterne: formazione e ricerca didattica in geografia: esperienze e prospettive*, 73-80.
- **Sack R. D.** (1986). *Human Territoriality: Its Theory and History*. Cambridge University Press.
- **Schmidt di Friedberg, M.** (2012). *Geografia a scuola. Monti, fiumi, capitali o altro?*. Milano: Guerini.
- **Schmidt, R., Stumpe, B.** (2025). Systematic review of mobile augmented reality applications in geography education. *Review of Education*, 13(1), e70042.
- **Schön, D. A.** (1983). *The Reflective Practitioner: How Professionals Think in Action*. Basic Books.
- **Schwaiger M., et al.** (2024). Educators' opinions about VR/AR/XR: An exploratory study. *Education and Information Technologies*, 29, DOI:24861-24880.
- **Sestini A.** (1974). Introduzione allo studio dell'ambiente: fondamenti di geografia fisica. In *Geografia e società*. Milano: FrancoAngeli.
- **Soelistiono S., Wahidin.** (2023). Educational technology innovation: AI-integrated learning system design in AILS-based education. *INFLUENCE: International Journal of Science Review*, 5(2), 470.
- **Stoakley, R., Conway, M. J., Pausch, R.** (1995). Virtual reality on a WIM: interactive worlds in miniature. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 265-272).
- **Stocco S., Botelho L. A. A.** (2025). GeoReasoning: Metodologie e strategie didattiche motivanti per lo sviluppo del ragionamento geografico. *Progress in Science Education (PriSE)*, 8(1), 6-21.

- **Tanca M.** (2023). Tracce di Humboldt nella geografia italiana del secondo dopoguerra. Una metabiografia?. In *RESOCONTI*, 8, 67-91.
- **Teddlie C., Tashakkori, A.** (2009). *Foundations of Mixed Methods Research: Integrating Quantitative and Qualitative Approaches in the Social and Behavioral Sciences*. SAGE Publications.
- **Thananthong T., Mangkhang C.** (2023). The guideline of community based historical learning to enhance digital citizenship of secondary school students in education sandbox. *Higher Education Studies*, 13(3), 135.
- **Thrift N.** (2008). *Non-Representational Theory: Space, Politics, Affect*. Routledge.
- **Timokhin P. Yu., Mikhaylyuk M. V.** (2023). Hybrid visualization with vulkan - OpenGL: Technology and methods of implementation in virtual environment systems. *Scientific Visualization*, 15(3), 7-17.
- **Trimarchi, R.** (2003). Geografia, didattica e nuove tecnologie. *Ambiente Società Territorio*, 48(4), 247-256.
- **Turco, A.** (1988). *Verso una teoria geografica della complessità*. Milano: Unicopli.
- **Turk, C., Balcik, E.** (2023). Augmented Reality in Geography Education: A Bibliometric Analysis and Literature Review. *Education and Information Technologies*, 28, 1-25.
- **Turri, E.** (2001). *Il paesaggio come teatro. Dal territorio vissuto al territorio rappresentato*. Milano: Marsilio.
- **UNESCO** (2023). *Global Education Monitoring Report 2023: Technology in education: A tool on whose terms?*.
- **Vallega, A.** (2004). *Geografia umana. Teoria e prassi*. Firenze: Le Monnier.
- **Varela, F. J., Thompson, E., Rosch, E.** (1991). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. Massachusetts: MIT Press.

- **Vaucheze, J., Bailly, C., Castet, J.** (2023). *UXR-kit: Une méthode d'idéation pour la co-conception centrée utilisateurs destinée aux solutions de réalité Étendue*.
- **Von Humboldt A.** (1986). *Il Cosmo. Saggio di una descrizione fisica del mondo* (F. Farinelli, A cura di). Pordenone: Edizioni Studio Tesi.
- **Vosniadou, S.** (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and Instruction*, 4(1), 45-69.
- **Wagner, P., Alharthi, D.** (2023). Leveraging VR/AR/MR/XR technologies to improve cybersecurity education, training, and operations. *Journal of Cybersecurity Education, Research and Practice*, 2024(1), 7.
- **Wang, Y., Li, C.** (2025). Empirical methods for enhancing user experience in human - computer interaction design with digital media integration. *Proceedings of the 2nd International Conference on Machine Learning and Automation*. DOI: 10.54254/2755-2721/104/20240907
- **Wellmann, F., Virgo, S., Escallón, D., de la Varga, M.** (2022). Open AR-Sandbox: A haptic interface for geoscience education and outreach. *Geosphere*, 18(2), 732–749.
- **Wilson, M.** (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636.
- **Woods, T. L., Reed, S., Hsi, S.,** (2016). Pilot study using the augmented reality sandbox to teach topographic maps and surficial processes in introductory geology labs. *Journal of Geoscience Education*, 64(3), 199-214.
- **Yi, X., Liu, Z., Li, H., Jiang, B.** (2024). Immersive experiences in museums for elderly with cognitive disorders: A user centered design approach. *Scientific Reports*, 14, 1971.

- **Zanolin, G.** (2017). Orientarsi nel tempo e nello spazio: la geografia localizzativa dalle conoscenze alla competenza. In G. Zanolin, T. Gilardi, R. De Lucia (A cura di), *Geo-didattiche per il futuro. La geografia alla prova delle competenze* (pp. 85-94). Milano: FrancoAngeli.
- **Zanolin, G., Gilardi, T., De Lucia, R.** (A cura di). (2017). *Geo-didattiche per il futuro. La geografia alla prova delle competenze*. Milano: FrancoAngeli.
- **Zbereanu, G.** (2024). The effects of using digital technologies on high school geography learning. *Journal of Innovation in Psychology, Education and Didactics*, 28(1), 47-60.

APPENDICI

APPENDICE A: Schemi Tecnici Dettagliati e Progetti Hardware/Software della Sandbox e della Streambox AR

Questa appendice riporta le specifiche tecniche, gli schemi di montaggio e i requisiti software necessari per la realizzazione e il funzionamento delle stazioni di lavoro utilizzate nella sperimentazione.

A.1. Architettura Hardware: Componenti e Assemblaggio

Il sistema AR Sandbox si basa sull'integrazione di quattro componenti hardware principali che lavorano in *loop* continuo (closed-loop system).

1. Struttura Fisica (The Box)

- **Materiale:** Legno multistrato (betulla o pioppo) spessore 18mm, trattato con vernice impermeabilizzante atossica.
- **Dimensioni Standard:** 100 cm (lunghezza) x 80 cm (larghezza) x 30 cm (profondità).
- **Supporto Sabbia:** La sabbia utilizzata è sabbia lavata di fiume bianca (tipo *Kinetic Sand* o sabbia per acquari lavata), scelta per le sue elevate proprietà riflettenti che garantiscono colori vividi durante la proiezione. Quantità necessaria: circa 80-150 kg.
- **Ruote:** La struttura è montata su carrello con ruote frenanti per garantire la mobilità tra le aule.

2. Sistema di Rilevamento (Input)

- **Sensore di Profondità:** Microsoft Kinect V2 o V1 (o modello equivalente come Intel RealSense D512 series).
- **Funzione:** Il sensore emette una griglia di raggi infrarossi (IR) invisibili per calcolare la distanza di ogni granello di sabbia dal sensore stesso, generando una *Depth Map* (mappa di profondità) in tempo reale a 30 fps.

- **Posizionamento:** Montato su un'asta telescopica in alluminio esattamente al centro della verticale sopra la scatola, a un'altezza di circa 180 cm dalla superficie della sabbia.

3. Sistema di Visualizzazione (Output)

- **Videoproiettore:** Modello a focale corta (*Short Throw*) per minimizzare le ombre proiettate dagli utenti quando interagiscono con la sabbia.
- **Luminosità:** Minimo 3000 ANSI Lumen (Samsung portatile) per visibilità anche in ambienti non completamente oscurati.
- **Posizionamento:** Installato accanto al sensore Kinect, ma leggermente decentrato per coprire l'intera area di lavoro senza interferenze fisiche.

4. Unità di Elaborazione (Computer)

- **Requisito Fondamentale:** Pc di modeste prestazioni.
- **OS:** Sistema operativo Windows o MacOS

A.2. Specifiche Software e Flusso Dati

Il “cervello” del sistema è il *software open-source*

Diagramma di Flusso del Software

1. **Scansione:** Il Kinect legge la superficie della sabbia.
2. **Filtering:** Il software pulisce il segnale dai “rumori” (es. mani dell'utente che si muovono velocemente).
3. **Mapping:**
 - Assegna un colore a ogni livello di altezza (Ipsometria).
 - Calcola le linee che uniscono punti di uguale altezza (Isoipse).
4. **Simulazione Idrologica (Saint-Venant Equations):**
 - Il software applica le *equazioni di Navier-Stokes* semplificate (o *Shallow Water Equations*) per simulare il comportamento di un fluido virtuale.

- Calcola velocità, gravità e viscosità dell'acqua virtuale in base alla pendenza della sabbia reale.

5. Rendering: L'immagine elaborata viene inviata al proiettore e sovrapposta perfettamente alla sabbia.

Parametri Configurabili (File di Configurazione)

Nel file GlobalConfig è possibile modificare per fini didattici:

- **Scala dei colori:** (es. Scala IGM, Scala Atlante, Scala "Vulcano").
- **Equidistanza:** Intervallo delle curve di livello (es. ogni 5 cm o ogni 10 cm reali).
- **Viscosità dell'acqua:** Modificabile per simulare acqua, lava (più lenta) o fango.

—

A.3. La Variante "StreamBox AR" (Focus Fluviale)

A differenza della Sandbox standard (rettangolare), la **Streambox** è progettata specificamente per lo studio dei corsi d'acqua e del dissesto idrogeologico.

Differenze Hardware e Strutturali

- 1. Geometria "Flume" (Canale):** La struttura non è quadrata ma allungata (es. 150 cm x 50 cm) per permettere lo sviluppo di un corso fluviale lungo (meandri, foce, sorgente).
- 2. Meccanismo di Inclinazione (Tilting):** La Streambox è dotata di martinetti meccanici o spessori graduati sotto le gambe posteriori per variare la pendenza generale del "letto del fiume" (Gradiente).
 - *Obiettivo didattico:* Dimostrare come l'aumento della pendenza aumenta la velocità di scorrimento e il potere erosivo.

Differenze Software (Simulazione Avanzata)

Per la Streambox, il software viene settato con parametri idrologici specifici:

- **Rain Source Costante:** Viene attivata una "sorgente virtuale" fissa a monte, che eroga acqua continuamente (simulazione di un fiume perenne) anziché la pioggia a comando gestuale tipica della Sandbox.

- **Erosione Virtuale:** In versioni avanzate, il software proietta texture diverse (es. “roccia” vs “sedimento”) che reagiscono diversamente al passaggio dell’acqua virtuale.

A.4. Schema di Calibrazione e Allineamento

La calibrazione è la fase critica: il proiettore deve “sapere” dove si trova ogni granello di sabbia visto dal Kinect.

Procedura di Calibrazione (4 Step):

1. **Keystone Fisico:** Regolazione manuale del proiettore per ottenere un rettangolo perfetto all’interno della scatola.
2. **Allineamento Kinect:** Verifica tramite software che il sensore veda l’intero fondo della scatola (piano di riferimento).
3. **Calibrazione 3D (Tool KinectProjectorCalibration):**
 - Si utilizza un disco di calibrazione (CD o marker circolare).
 - Il software proietta un mirino a croce.
 - L’operatore posiziona il disco esattamente sulla croce proiettata e registra il punto.
 - L’operazione si ripete per 12-20 punti a diverse altezze e posizioni.
4. **Generazione Matrice:** Il sistema crea una matrice di trasformazione geometrica che lega i pixel del proiettore ai voxel (pixel 3D) del sensore.

A.5. Troubleshooting e Manutenzione (Guida Rapida)

Problema Ricontrato	Causa Probabile	Soluzione Tecnica
Disallineamento (La pioggia cade “fuori” dalla valle)	La scatola è stata spostata o urto al proiettore.	Rieseguire la procedura di allineamento rapido (re-align) o la calibrazione completa.
“Buchi” neri nella proiezione	Ombre proiettate dall’utente o sensore sporco.	Pulire delicatamente la lente del Kinect; invitare gli studenti a non coprire il fascio di luce.

L'acqua virtuale non scorre (ristagna)	La sabbia è troppo piatta o "buche" troppo piccole (rumore del sensore).	Usare la funzione "Level Sand" (spianare) per resettare il livello zero; aumentare la pendenza.
Sfarfallio dell'immagine (Flickering)	Interferenza luminosa (luce solare diretta o neon).	Oscurare l'aula; le frequenze dei neon possono interferire con l'IR del Kinect.

APPENDICE B: *Il Corpus degli Apprendimenti Geografici Complessi*

B.1. Premessa Epistemologica e Metodologica

Il presente Corpus sistematizza gli obiettivi di apprendimento specifici legati alla visualizzazione spaziale e alla comprensione geomorfologica, oggetto dell'intervento didattico sperimentale con la Sandbox AR.

La tassonomia qui proposta nasce dall'intersezione tra:

1. I traguardi per lo sviluppo delle competenze previsti dalle *Indicazioni Nazionali per il curriculum* (MIUR, 2012) e dai *Nuovi Scenari* (2018).
2. Il *framework* dello Spatial Thinking (Pensiero Spaziale) teorizzato dal National Research Council (2006) e del GeoReasoning (Golledge, Marsh, Battersby, 2008), intesi come unione di tre elementi: concetti spaziali, strumenti di rappresentazione e processi di ragionamento.
3. Il modello TPACK (Mishra, Koehler, 2006; Doering et al. 2014; Huh, Jo, 2023), che guida l'integrazione della tecnologia AR non come semplice supporto visivo, ma come mediatore attivo nella costruzione del sapere.

B.2. Tassonomia Dettagliata degli Apprendimenti

1. DOMINIO DELLA RAPPRESENTAZIONE E TRANSCODIFICA (2D ↔ 3D)

Questo dominio riguarda la capacità di tradurre codici visivi astratti (mappa) in forme concrete (rilievo) e viceversa, riducendo il carico cognitivo solitamente richiesto per la visualizzazione mentale.

- Decodifica e interpretazione delle Isoipse (Curve di Livello)
 - Concettualizzazione dell'Isoipsa: Comprendere che una linea chiusa sulla carta non è un confine fisico, ma il luogo geometrico dei punti aventi la stessa quota altimetrica (equidistanza).
 - Correlazione Densità/Pendenza: Saper inferire la morfologia del versante dalla densità delle linee:

- *Linee dense (ravvicinate)*: Riconoscimento di pareti ripide, scarpate o falesie.
- *Linee rade (distanziate)*: Riconoscimento di pendii dolci, pianure o fondovalle.
- Riconoscimento di Forme Specifiche: Identificare la “firma topografica” di forme elementari:
 - *Cerchi concentrici*: Cime, colline isolate o crateri (se con depressione centrale).
 - *Forme a “V” o “U”*: Incisioni vallive, dove la punta della V indica la direzione della sorgente (contro-pendenza).
- Padronanza del Simbolismo Cromatico (Ipsometria)
 - Associazione Tinta-Quota: Abbinare correttamente le tinte ipsometriche convenzionali (verde, giallo, marrone, bianco) alle fasce altimetriche reali.
 - Dinamismo del Livello Zero: Comprendere il concetto di “livello del mare” non come dato statico ma dinamico (simulazione di innalzamento delle acque e conseguente modifica della linea di costa).

2. DOMINIO GEOMORFOLOGICO E IDROLOGICO (SYSTEMS THINKING)

Competenze legate alla comprensione delle forme del territorio come risultato di processi dinamici e sistemici, facilitati dalla manipolazione cinestesica (haptic).

- Morfogenesi e Modellazione del Rilievo
 - Distinzione Convesso/Concavo: Discriminare e riprodurre manualmente forme positive (rilievi, dorsali) e forme negative (depressioni, doline, valli).
 - Anatomia del Rilievo: Identificare e nominare correttamente le parti costitutive di una montagna durante la modellazione: *piede, versante, crinale, vetta, passo/valico*.

- Processi Erosivi e Deposizionali: Osservare intuitivamente (tramite la manipolazione della sabbia) come la materia si sposta dall'alto verso il basso per gravità, simulando frane o accumuli detritici.
- Dinamica delle Acque e Bacini Idrografici
 - Concetto di Bacino Imbrifero (Catchment Area): Visualizzare l'area geografica che raccoglie le acque piovane e le convoglia verso un unico punto di uscita (chiusura del bacino).
 - Identificazione dello Spartiacque (Watershed): Riconoscere la linea di cresta che funge da divisore topografico delle acque, determinando il deflusso in bacini adiacenti ma distinti.
 - Regimazione delle Acque: Comprendere la relazione causa-effetto tra la pendenza del versante e la velocità di scorrimento dell'acqua virtuale (più ripido = deflusso più rapido ed erosivo).

3. DOMINIO DELL'ORIENTAMENTO E PROSPETTIVA (ORIENTATION)

Capacità di orientarsi nello spazio fisico e rappresentato, gestendo il cambio di punto di vista.

- Orientamento Assoluto e Relativo:
 - Allineare il modello tridimensionale nella Sandbox con i punti cardinali reali dell'aula o con una mappa di riferimento esterna.
 - Utilizzare correttamente coordinate topologiche (*sopra, sotto, destra, sinistra, davanti, dietro*) riferite non al proprio corpo (egocentrico), ma agli oggetti geografici modellati (allocentrico).
- Rotazione Mentale e Cambio di Prospettiva:
 - Confrontare la visione zenitale (dall'alto, tipica della carta topografica proiettata) con la visione prospettica/laterale (tipica dell'osservazione del paesaggio reale).

4. DOMINIO ANTROPICO E PROGETTUALE (SPATIAL CITIZENSHIP)

Applicazione delle conoscenze geografiche per risolvere problemi complessi e prendere decisioni sul territorio (simulazione).

- Valutazione del Rischio Idrogeologico:
 - Ipotizzare scenari di rischio posizionando insediamenti umani (case giocattolo/marker) in aree morfologicamente diverse (fondovalle alluvionale vs collina sicura).
 - Osservare le conseguenze di eventi estremi simulati (es. “pioggia intensa”) sugli insediamenti ipotizzati.
- Progettazione Infrastrutturale Sostenibile:
 - Identificare i percorsi ottimali per la costruzione di infrastrutture lineari (strade, ferrovie) cercando le linee di minor pendenza (seguendo le curve di livello) per minimizzare l’impatto ambientale e i costi.

B.3. Corrispondenza con le Indicazioni Nazionali (Primo Ciclo)

Obiettivo del Corpus (Sandbox AR)	Traguardo di Competenza (Indicazioni Nazionali)
Transcodifica 2D/3D	<i>L'alunno si orienta nello spazio circostante e sulle carte geografiche, utilizzando riferimenti topologici e punti cardinali.</i>
Simbolismo e Isoipse	<i>Utilizza il linguaggio della geo-graficità per interpretare carte geografiche e globo terrestre, realizzare semplici schizzi cartografici e carte tematiche.</i>
Idrografia e Morfologia	<i>Individua i caratteri che connotano i paesaggi (di montagna, collina, pianura, vulcanici, ecc.) con particolare attenzione a quelli italiani.</i>
Rischio e Progettazione	<i>Si rende conto che lo spazio geografico è un sistema territoriale, costituito da elementi fisici e antropici legati da rapporti di connessione e/o di interdipendenza.</i>

B.4. Valore Aggiunto della Tecnologia AR (Note per il Docente)

L'efficacia di questo corpus risiede nelle *affordance* specifiche della Sandbox AR:

1. Feedback Visivo Immediato (Real-time): L'alunno non deve attendere la correzione del docente; la mappa si aggiorna istantaneamente al tocco, permettendo l'autocorrezione (trial-and-error).
2. Multimodalità: L'apprendimento passa attraverso il canale visivo (colori, linee), cinestesico (tatto, manipolazione della sabbia) e motorio, favorendo stili di apprendimento diversi, inclusivi per alunni con BES/DSA.
3. Reificazione dell'Astratto: Concetti invisibili o astratti (curve di livello, spartiacque) diventano oggetti fisici manipolabili.

APPENDICE C: Unità Didattiche e Questionari Utilizzati nelle Sperimentazioni

In questa sezione sono riportati i protocolli operativi utilizzati durante la fase di ricerca-azione, comprensivi di piano di lavoro (UdA) e strumenti di rilevazione dati.

C.1. Unità di Apprendimento Sperimentale (UdA)

Titolo: “Dal Piano al Rilievo: Modelliamo il Territorio”

Target: Scuola Secondaria di I Grado (Classe Prima) / Scuola Primaria (Classe Quinta)

Durata: 2 ore

Setting: Aula dedicata o laboratorio con Sandbox AR, LIM, tavoli per lavoro di gruppo.

Fase 1: Ingaggio e Attivazione (15 min)

- *Attività:* Brainstorming guidato davanti a una carta topografica IGM proiettata alla LIM.
- *Domanda stimolo:* “Come facciamo a sapere se questa montagna è ripida o dolce guardando un foglio piatto?”
- *Obiettivo:* Far emergere le misconcezioni sulla lettura delle carte 2D.

Fase 2: Esplorazione Libera e Guidata (Sandbox AR) (45 min)

- *Attività:* Gli studenti, divisi in piccoli gruppi, interagiscono con la sabbia.
- *Task 1 (Sensoriale):* Creare una montagna alta e una pianura. Osservare il cambio di colore in tempo reale.
- *Task 2 (Tecnico):* Creare un vulcano (depressione sommitale). Osservare come le curve di livello formano cerchi concentrici.
- *Task 3 (Idrografico):* Simulare la pioggia (gesto della mano aperta sopra la sabbia). Osservare dove scorre l’acqua virtuale.

Fase 3: Transcodifica e Consolidamento (30 min)

- *Attività:* Confronto tra il modello sabbioso appena creato e la sua proiezione 2D sullo schermo collegato.

- *Debriefing*: L'insegnante guida la riflessione: "Guardate le linee dove la montagna è ripida: sono vicine o lontane?"

Fase 4: Verifica dell'Apprendimento (30 min)

- *Attività*: Somministrazione del Post-Test e discussione finale.

C.2. Strumenti di Rilevazione (Questionari)

C.2.1. Pre-Test (Conoscenze Pregresse)

Da somministrare prima dell'intervento per valutare il livello di partenza.

1. Su una carta geografica fisica, il colore marrone scuro indica solitamente:
 - ☐ Deserto
 - ☐ Alta montagna
 - ☐ Pianura fertile
 - ☐ Collina
2. Cosa sono le "Isoipse" (o curve di livello)?
 - ☐ Linee che indicano i fiumi
 - ☐ Linee che uniscono punti con la stessa temperatura
 - ☐ Linee che uniscono punti alla stessa altitudine
 - ☐ I confini tra due regioni
3. Se su una mappa le curve di livello sono disegnate molto vicine tra loro, significa che:
 - ☐ Il terreno è pianeggiante
 - ☐ C'è un fiume
 - ☐ Il pendio è molto ripido
 - ☐ Il pendio è dolce e facile da scalare
4. *(Immagine di una mappa topografica 2D)* Indica con una X dove si trova la vetta della montagna.

C.2.2. Post-Test (Verifica Apprendimenti)

Da somministrare al termine dell'intervento.

1. Durante l'attività con la sabbia, quando accumulavi molta sabbia in un punto, il colore diventava:
 - ☐ Verde
 - ☐ Blu
 - ☐ Rosso/Marrone/Bianco
 - ☐ Giallo
2. Hai creato una valle nella sabbia e hai simulato la pioggia. Dove è andata l'acqua?
 - ☐ È rimasta ferma sui lati
 - ☐ È scesa verso il punto più basso raccogliendosi al centro
 - ☐ È salita verso la cima
3. Guardando dall'alto la tua montagna di sabbia: come apparivano le linee di livello sul versante più ripido?
 - ☐ Molto distanziate
 - ☐ Molto ravvicinate (fitte)
 - ☐ Non c'erano linee
4. A cosa serve lo "Spartiacque" che abbiamo osservato?
 - ☐ A dividere l'acqua che scende su due versanti opposti
 - ☐ A misurare l'altezza della montagna
 - ☐ A fermare la pioggia

C.2.3. Questionario di Gradimento e Usabilità

Scala Likert (1 = Per niente, 5 = Moltissimo) o Faccine per la primaria.

1. Ti sei divertito a usare la Sandbox AR? (1-5)
2. È stato facile modellare la sabbia per creare le forme richieste? (1-5)

3. Pensi di aver capito meglio le mappe geografiche grazie a questo strumento rispetto al libro di testo? (1-5)
4. Ti piacerebbe usare questo strumento per altre lezioni? (Sì/No)
5. Domanda aperta: Qual è la cosa che ti ha colpito di più dell'attività?

○

-

C.2.4. Griglia di Osservazione per il Docente (Valutazione Qualitativa)

Da compilare durante l'attività a cura del ricercatore/insegnante.

Indicatore	Basso	Me- dio	Alto	Note Osser- vative
Partecipazione: Livello di coinvolgimento attivo degli studenti	[]	[]	[]	
Collaborazione: Capacità di lavorare in gruppo sulla sabbiera	[]	[]	[]	
Comprensione Immediata: Reazione corretta al feedback visivo (colori/linee)	[]	[]	[]	
Lessico: Uso appropriato dei termini (vetta, versante, valle) durante il lavoro	[]	[]	[]	
Inclusione: Partecipazione degli alunni con BES/Disabilità	[]	[]	[]	

APPENDICE D: Test di valutazione delle competenze geografiche (geotecnologie - Sandbox AR)

Nome e Cognome: _____ Classe: _____ Data: _____

Tempo a disposizione: 45 minuti

SEZIONE 1: Interpretazione delle isoipse e della morfologia (4 Domande)

Obiettivo: Valutare la capacità di traduzione 2D/3D e la relazione equidistanza-pendenza.

1. Osserva la carta topografica fornita. In quale zona la pendenza del terreno è più ripida?
 - ☐ A. Dove le curve di livello (isoipse) sono molto distanti tra loro.
 - ☐ B. Dove le curve di livello sono molto vicine tra loro.
 - ☐ C. Dove le curve di livello sono perfettamente circolari.
 - ☐ D. Dove non sono presenti curve di livello.
2. Se ti trovi sulla cima di una collina rappresentata da cerchi concentrici di isoipse, cosa indica l'altitudine se ti sposti verso l'esterno?
 - ☐ A. Aumenta.
 - ☐ B. Diminuisce.
 - ☐ C. Rimane costante.
 - ☐ D. Diventa negativa.

3. (Domanda Aperta Breve)

Spiega in massimo 3 righe cos'è un' "equidistanza" in una carta topografica e perché è fondamentale per calcolare l'altezza reale di una montagna.

4. Osservando il modello 3D (o la sua foto), identifica la forma del rilievo: si tratta di una valle a “V” (fluviale) o a “U” (glaciale)? Motiva la risposta basandoti sulla forma delle isoipse.

SEZIONE 2: Ciclo idrologico e bacini idrografici (4 Domande)

Obiettivo: Comprensione dello scorrimento e delimitazione spaziale dei bacini.

5. Cos'è uno “spartiacque” in un bacino idrografico?

- ☐ A. Il punto più basso dove si raccoglie l'acqua.
- ☐ B. La linea immaginaria che corre lungo i crinali e separa le acque che scorrono in bacini diversi.
- ☐ C. Un canale artificiale costruito per l'irrigazione.
- ☐ D. La foce del fiume principale.

6. Se piove intensamente su un terreno impermeabile (es. roccia nuda o cemento), cosa succede allo scorrimento superficiale (runoff) rispetto a un terreno boschivo?

- ☐ A. È minore e più lento.
- ☐ B. È maggiore e più veloce.
- ☐ C. Non c'è alcuna differenza.
- ☐ D. L'acqua evapora istantaneamente.

7. Osserva l'immagine della Sandbox AR con la simulazione della pioggia. Indica con una crocetta il punto esatto dove si formerà un lago.

(Spazio per immagine o schema)

8. (Domanda Aperta Breve)

Definisci il concetto di “Bacino Idrografico” utilizzando i termini: affluente, pendenza e foce.

SEZIONE 3: Evoluzione del paesaggio: erosione e sedimentazione (4 Domande)

Obiettivo: Relazione tra pendenza, velocità dell’acqua e capacità erosiva.

9. In quale parte del corso di un fiume l’erosione è solitamente più forte?

- ☐ A. Alla foce (dove il fiume incontra il mare).
- ☐ B. Nel corso medio (pianura).
- ☐ C. Nel corso superiore (montagna, alta pendenza).
- ☐ D. Nei laghi.

10. Cosa accade ai sedimenti (sabbia, detriti) quando la velocità dell’acqua diminuisce drasticamente?

- ☐ A. Vengono trasportati più velocemente.
- ☐ B. Si depositano sul fondo (sedimentazione).
- ☐ C. Si sciolgono chimicamente nell’acqua.
- ☐ D. Tornano verso la sorgente.

11. (Domanda Aperta Breve)

Immagina di aumentare la pendenza di un fiume nella Sandbox AR. Prevedi cosa accadrà alla forma dell’alveo (il letto del fiume) e spiega il perché.

12. Quale fattore rallenta maggiormente l’erosione di un versante collinare?

- ☐ A. La presenza di vegetazione fitta (radici).

- ☐ B. L'assenza di vegetazione.
- ☐ C. Una pendenza molto elevata.
- ☐ D. Un suolo sabbioso e sciolto.

SEZIONE 4: Proiezioni cartografiche e deformazione spaziale (4 Domande)

Obiettivo: Consapevolezza della distorsione piano/sfera.

13. Perché è impossibile rappresentare la Terra su una carta geografica piana senza commettere errori?

- ☐ A. Perché la Terra è troppo grande.
- ☐ B. Perché la superficie sferica non è sviluppabile su un piano senza deformazioni.
- ☐ C. Perché non abbiamo satelliti abbastanza precisi.
- ☐ D. È possibile, basta usare la proiezione di Mercatore.

14. Nella proiezione di Mercatore (usata spesso per la navigazione), le dimensioni della Groenlandia appaiono:

- ☐ A. Molto più piccole della realtà.
- ☐ B. Esattamente uguali alla realtà.
- ☐ C. Molto più grandi della realtà (dilatate verso i poli).
- ☐ D. Non viene rappresentata la Groenlandia.

15. (Domanda Aperta Breve)

Spiega la differenza principale tra una mappa “fisica” proiettata sulla sabbia (3D) e una mappa cartacea tradizionale (2D) in termini di distorsione delle distanze.

16. Quale strumento tecnologico permette di superare il problema della proiezione fissa, permettendo di “girare” intorno al globo?

- ☐ A. L'Atlante cartaceo.

- ☐ B. Il Geo-browser (es. Google Earth).
- ☐ C. La carta murale.
- ☐ D. La bussola.

SEZIONE 5: Relazione clima, vegetazione e uso del suolo (4 Domande)

Obiettivo: Interconnessioni sistemiche e antropiche.

17. Se in un'area il clima diventa improvvisamente più arido (meno piogge), quale cambiamento prevedi nell'uso del suolo agricolo?

- ☐ A. Aumento delle coltivazioni di riso (che richiede molta acqua).
- ☐ B. Passaggio a colture resistenti alla siccità o abbandono dei campi (desertificazione).
- ☐ C. Nessun cambiamento.
- ☐ D. Aumento spontaneo delle foreste pluviali.

18. Qual è l'effetto dell'urbanizzazione (costruzione di città e asfalto) sul microclima locale?

- ☐ A. Diminuzione della temperatura (Isola di freddo).
- ☐ B. Aumento della temperatura (Isola di calore urbana) e impermeabilizzazione del suolo.
- ☐ C. Aumento della biodiversità vegetale.
- ☐ D. Maggiore assorbimento dell'acqua piovana.

19. (Domanda Aperta Breve)

Collega con una freccia logica o spiega la relazione tra: “Disboscamento di un versante montano” -> “Rischio idrogeologico a valle”.

20. In quale bioma ci aspettiamo di trovare una vegetazione scarsa, temperature estreme e suoli poveri?

- ☐ A. Foresta temperata.
- ☐ B. Prateria.
- ☐ C. Deserto.
- ☐ D. Macchia mediterranea.

APPENDICE E: Tabelle e dati

E1. Metriche dashboard

Studente	Isoipse (Morfologia)	Idrografia (Dinamica)	Erosione (Processi)	Collaborazione (Soft Skill)	Status (Sistema)
S. Bianchi	4.5	3.2	4.0	4.8	✅ Ottimale
M. Rossi (BES)	2.1	2.5	1.8	3.0	⚠️ Alert: Supporto Richiesto
L. Verdi	3.8	4.0	3.5	4.2	✅ Ottimale
G. Neri	4.2	4.5	4.1	3.9	✅ Eccellente
A. Gialli	3.0	3.2	2.9	3.5	🟡 Monitorare

E2. Dataset Sintetici utilizzati nelle sperimentazioni: tabelle

Tabella 1: Mappa dei Bisogni - Dati Rilevati (Fase 1)

Macro-Area	Fattore Chiave	Rilevanza (Punteggio 0-100)	Descrizione
Condizioni Operative	Infrastruttura Tecnica	92	Disponibilità di WiFi stabile e dispositivi hardware per studenti/docenti.
Condizioni Operative	Vincoli Organizzativi	78	Rigidità degli orari scolastici e disponibilità delle aule.
Condizioni Operative	Budget Disponibile	65	Risorse economiche allocate per la prototipazione rapida.
Aspetti Cognitivi	Modalità Apprendimento	88	Preferenza per apprendimento visivo e attivo (learning-by-doing).
Aspetti Cognitivi	Bisogni Inclusivi (BES)	85	Necessità di strumenti adattivi per studenti con Bisogni Educativi Speciali.
Aspetti Cognitivi	Conoscenze Pregresse	74	Livello di alfabetizzazione digitale di partenza dell'utenza.
Attività Co-design	Partecipazione Workshop	95	Tasso di adesione attiva di docenti e studenti alle sessioni di ideazione.

Attività Co-design	Idee Generate	80	Quantità e qualità delle proposte innovative emerse durante il brainstorming.
--------------------	---------------	----	---

Tabella 2: Dati Sperimentali - Test Parametrici in Ambiente Controllato (TincTEC) (Fase 2)

Parametro Testato	Tecnologia (Prototipo)	Punteggio Interazione (0-100)	Note Operative (Lab Setting)
Gestione Cromatica	Sandbox AR	88	Risposta al cambio di curve di livello colore in tempo reale.
Gestione Cromatica	Streambox AR	76	Contrasto e saturazione su proiezione 2D/3D ibrida.
Manipolazione Media	Sandbox AR	92	Interazione tattile diretta con la materia (sabbia).
Manipolazione Media	Streambox AR	85	Manipolazione oggetti tramite marker/controller.
Usabilità Interfaccia	Sandbox AR	78	Facilità di accesso ai menu di calibrazione on-screen.
Usabilità Interfaccia	Streambox AR	89	Navigazione menu e stabilità del tracking.
Percezione 3D	Sandbox AR	95	Comprensione immediata della topografia aumentata.
Percezione 3D	Streambox AR	82	Percezione profondità tramite display/proiezione.

Tabella 3: Validazione Post-Test e Ottimizzazione Tramite Piattaforme Modulari (Fase 3)

Indicatore Qualitativo	Fase 1: Interviste (Pre-Ottimizzazione)	Fase 2: Dati Automatici (Post-Ottimizzazione)	Delta Miglioramento (+%)	Note sul Processo
Usabilità Percepita (UI)	68/100	89/100	+30.8%	Affinamento estetico dei comandi basato su feedback verbale.
Orientamento Spaziale	62/100	85/100	+37.0%	Introduzione di landmark visivi nell'ambiente AR.
Facilità Personalizzazione	74/100	91/100	+22.9%	Semplificazione dei menu di scelta media/colori.
Autonomia Analisi (Non-Esperti)	55/100	88/100	+60.0%	Implementazione dashboard web user-friendly.

Tabella 4: Classificazione Requisiti Utente tramite Metodo Kano-AHP

Requisito Funzionale	Categoria Kano	Importanza Utente (AHP 0-1)	Capacità Implementazione (0-100)	Note di Priorità
Stabilità del Tracking 3D	Must-be (Base)	0.95	90	Critico e fattibile: Priorità assoluta.

Tutorial Integrato	Must-be (Base)	0.90	95	Essenziale per l'onboarding, basso costo tecnico.
Risposta in Tempo Reale	Performance	0.88	65	Alta richiesta, richiede ottimizzazione risorse.
Modalità Offline	Must-be (Base)	0.85	75	Necessaria per continuità operativa.
Esportazione Dati Cloud	Performance	0.82	85	Funzione standard ad alto valore percepito.
Compatibilità Multi-device	Performance	0.75	70	Importante per scalabilità nelle scuole.
Gamification	Attractive	0.60	80	Elemento motivazionale, facile da aggiungere.
Avatars Personalizzabili	Attractive	0.55	50	Desiderabile ma non bloccante.
Interazione Vocale	Attractive	0.45	40	Bassa priorità attuale, complessità elevata.
Analisi Predittiva AI	Attractive	0.40	30	Funzione avanzata per sviluppi futuri.

Tabella 5: Protocollo Metodologico del Disegno Sperimentale (Mixed Methods)

Fase Temporale	Componente Metodologica	Gruppo Target	Strumenti di Rilevazione	Obiettivo della Fase
T0 (Pre-Test)	Quantitativa (Baseline)	GC + GS (Studenti)	Test d'ingresso standardizzato (Corpus Geo Complesso)	Accertare l'omogeneità di partenza delle competenze geografiche e digitali.
Intervento (4-6 Settimane)	Didattica (Variabile Indipendente)	Gruppo Controllo (GC)	Lezione frontale, uso del libro di testo, carte murali 2D.	Isolare l'effetto della variabile "tecnologia" mantenendo invariati i contenuti.
Intervento (4-6 Settimane)	Didattica (Variabile Indipendente)	Gruppo Sperimentale (GS)	Laboratori immersivi con Sandbox AR e Streambox AR.	Stimolare l'apprendimento cinestetico e la visualizzazione 3D.
Monitoraggio "in itinere"	Qualitativa (Concurrent)	GS (Studenti BES + Docenti)	1. Osservazione Strutturata: Griglie su engagement e spazialità. 2. Diari di Bordo: Note narrative dei docenti.	Catturare dinamiche inclusive, <i>break-through</i> cognitivi e difficoltà logistiche in tempo reale.
T1 (Post-Test)	Quantitativa (Outcome)	GC + GS (Studenti)	Test di uscita (parallelo al T0).	Misurare il delta di apprendimento e la ritenzione dei concetti geografici.

Analisi e Validazione	Qualitativa (Post-Hoc)	Docenti / Stakeholder	Questionari di validazione (Open-ended).	Raccogliere percezioni su efficacia e sostenibilità (Analisi NLP).
Integrazione Dati	Triangolazione Mixed Methods	Tutto il Dataset	GeoAI (Clustering Spaziale) + Statistica Descrittiva.	Correlare i risultati numerici (performance) con il contesto qualitativo (percezioni/geografia).

Tabella 6. Risultati Comparativi della Sperimentazione Triennale (Media Punteggi Test Standardizzati)

Anno Scolastico	Gruppo	N. Studenti	Media Pre-Test (T0)	Media Post-Test (T1)	Incremento	Note sull'annualità
2023	Controllo (GC)	18	8.4	10.0	+1.6	<i>Fase Pilota</i>
	Sperim. (GS)	18	8.3	11.8	+3.5	<i>Primo utilizzo Sandbox</i>
2024	Controllo (GC)	20	8.6	10.2	+1.6	
	Sperim. (GS)	20	8.5	12.4	+3.9	<i>Introdotta Streambox</i>
2025	Controllo (GC)	22	8.5	10.4	+1.9	
	Sperim. (GS)	22	8.4	12.7	+4.3	<i>Protocollo consolidato</i>
TO-TALE	Controllo (GC)	60	8.5 (42.5%)	10.2 (51.0%)	+1.7	SD = 2.5
(Dati analisi)	Sperim. (GS)	60	8.4 (42.0%)	12.3 (61.5%)	+3.9	SD = 2.7

Tabella 7. Incremento medio di apprendimento per “Concetto Soglia” (Scala /20).

Concetto del Corpus (Topic)	Gruppo	Media Pre (T0)	Media Post (T1)	Incremento (Delta)	Gap (Vantaggio GS)
1. Isoipse e Morfologia	Controllo (GC)	7.8	8.6	+0.8	
<i>(Topic 3D)</i>	Sperim. (GS)	7.9	11.2	+3.3	+2.6 (Forte)
2. Ciclo Idrologico	Controllo (GC)	8.2	9.1	+0.9	
<i>(Topic Dinamico)</i>	Sperim. (GS)	8.1	10.8	+2.7	+1.7 (Medio)
3. Erosione / Sedimentazione	Controllo (GC)	7.5	8.2	+0.7	
	Sperim. (GS)	7.6	10.1	+2.5	+1.9 (Medio)
4. Proiezioni Cartografiche	Controllo (GC)	9.0	9.6	+0.6	

(Topic Astratto)	Sperim. (GS)	8.9	10.2	+1.3	+0.6 (Basso)
------------------	--------------	-----	------	------	--------------

Tabella 8. Risultati comparativi Pre-Test (T0) e Post-Test (T1) per gruppo di indagine. *Scala di valutazione: 0-20 punti.*

Gruppo di Indagine	Punteggio Medio T0 (Pre)	% Risposte Corrette T0	Punteggio Medio T1 (Post)	% Risposte Corrette T1	Delta (Incremento)	Note sull'Apprendimento
Gruppo Controllo (GC)	8.5 / 20	42.5%	10.2 / 20	51.0%	+1.7	Miglioramento modesto, limitato al consolidamento mnemonico.
Gruppo Sperimentale (GS)	8.4 / 20	42.0%	12.3 / 20	61.5%	+3.9	Incremento significativo. Raggiungimento di una competenza solida e diffusa.
Sottogruppo BES (GS-BES)	7.1 / 20	35.5%	11.8 / 20	59.0%	+4.7	Risultato ottimo: il gap con il gruppo generale si riduce drasticamente (da -1.3 a -0.5).

Tabella 9. Analisi qualitativa

Concetto del Corpus	Incremento GC (Tradizionale)	Incremento GS (Sandbox AR)	Gap (Vantaggio GS)
1. Isoipse, Morfologia	+0.8	+3.1	+2.3
2. Ciclo Idrologico	+0.9	+3.2	+2.3
3. Erosione Sedimentazione	+0.7	+2.9	+2.2
4. Proiezioni Cartografiche	+0.6	+2.1	+1.5
5. Clima, Uso del Suolo	+1.2	+2.4	+1.2

Tabella 10. Competenze Relazionali (Post-Test). *Scala Likert 1-5 (1=Minimo, 5=Massimo)*

Anno	Gruppo	Collaborazione	Comunicazione	Negoziazione	Inclusione
2023	Controllo	3.5	3.6	3.2	3.4
	Sperimentale	4.1	3.9	3.8	4.2
2024	Controllo	3.6	3.7	3.2	3.5
	Sperimentale	4.3	4.1	4.0	4.4
2025	Controllo	3.7	3.8	3.2	3.6
	Sperimentale	4.5	4.3	4.2	4.6
MEDIA TOTALE	Controllo (GC)	3.6	3.7	3.2	3.5
(Rif. Testi)	Sperim. (GS)	4.3	4.1	4.0	4.4

Tabella 11: Tasso di Coinvolgimento. *Percentuale di studenti attivi/motivati osservati durante le lezioni.*

Gruppo	Coinvolto / Motivato	Non Coinvolto / Passivo	Fonte Dati
Gruppo Sperimentale (GS)	95%	5%	Osservazione diretta
Gruppo Controllo (GC)	60%	40%	Lezione frontale standard

Tabella 12. Confronto performance studenti BES vs Normotipici (Post-Test T1). *Scala in ventesimi (/20)*

Gruppo	Tipologia Studente	N	Media T1 (Post-Test)	Analisi del Gap (Interpretazione)
Gruppo Controllo	Normotipici	48	10.7	Sufficienza stiracchiata.
(Metodo Tradizionale)	BES	12	8.1	Gap ampio (-2.6): Restano gravemente insufficienti.
Gruppo Sperimentale	Normotipici	48	12.5	Buona competenza.
(Sandbox AR)	BES	12	11.8	Gap quasi azzerato (-0.7): Raggiungono la piena sufficienza.

Tabella 13. Analisi Tematica (Docenti). *Frequenza dei temi emersi nei questionari qualitativi.*

Categoria Tematica	Tipo	Frequenza (%)
Comprensione/Concretezza	Potenzialità	14.5%
Motivazione/Attenzione	Potenzialità	14.5%
Inclusione (BES)	Potenzialità	12.0%
Costi e Logistica	Criticità	13.2%
Formazione Docenti	Criticità	10.5%
Limiti Tecnici	Criticità	8.0%

APPENDICE F: Risorse digitali, Codici QR, materiali vari della ricerca

F1: QR Code per accesso a *Survey* digitali



Figura 40. Accesso alla Survey per docenti e specialisti. Elaborazione dell'autore



Figura 41. Accesso al dataset completo dei risultati della Survey docenti. Elaborazione dell'autore

F2: Accesso alla piattaforma di disseminazione delle tecnologie Sandbox AR e Streambox AR

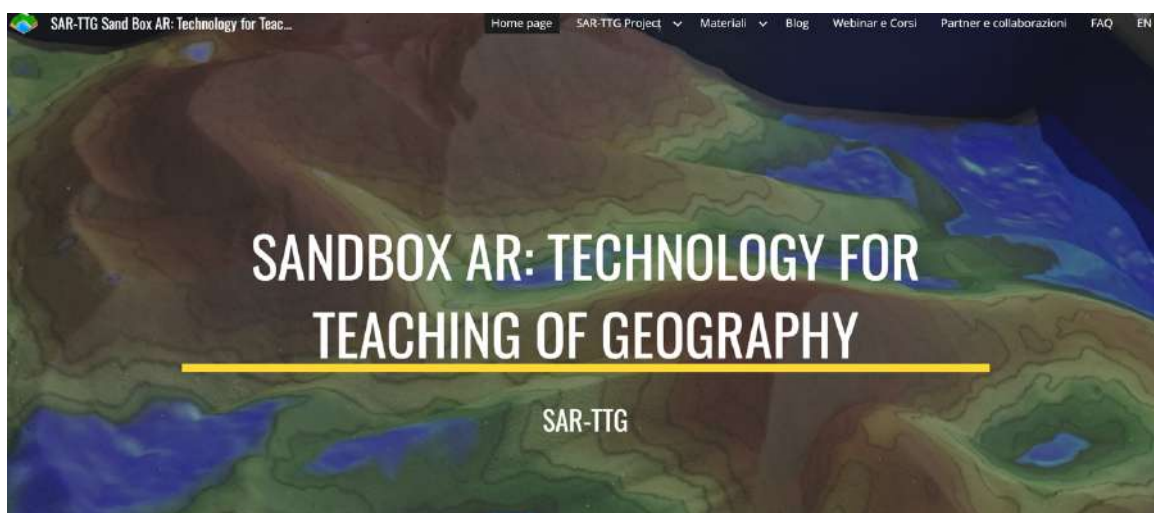


Figura 42. Screen della Home Page del sito dedicato alla Sandbox AR di Unimc. Sito realizzato dall'autore.



Figura 43. QR Code per l'accesso al sito del progetto Sandbox AR di Unimc. Elaborazione dell'autore.

F3: Altri prodotti di ricerca correlati sperimentazioni.

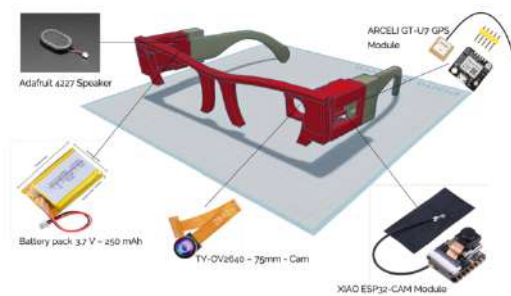


Figura 44. Sviluppo di Ai Glasses per gli studi geografici. Costruzione dell'autore.

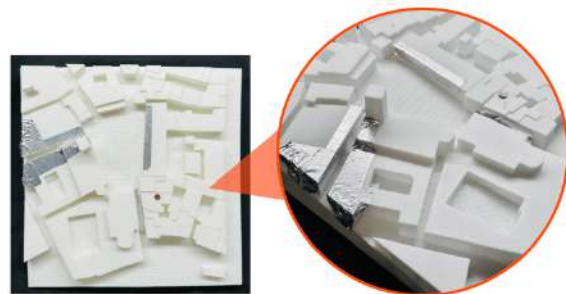


Figura 45. Prototipi di stampe 3D di geografie cittadine note, rielaborate a partire da cartografia GIS. Utilizzabili nelle simulazioni in Sandbox AR. Costruzione dell'autore.