



Gruppo di lavoro sulle tecniche
di insegnamento e di apprendimento

<https://riviste.unige.it/index.php/glia/index>
2975-0075

N° 5 - Anno 2026
pp. 271-288

XR, Intelligenza Artificiale Generativa e agenti conversazionali nell'Edu-Metaverso

Strumenti, casi d'uso, modelli locali e implicazioni

**Saverio IACONO¹, Gaia LORENZONI², Luca MARTINI³, Matteo
SCARAMUZZINO⁴, Gianni Viardo VERCELLI⁵, Daniele ZOLEZZI⁶**

1 DIBRIS – Università degli Studi di Genova, Genova (GE), saverio.iacono@unige.it

2 DLCM – Università degli Studi di Genova, Genova (GE), gaia.lorenzoni@edu.unige.it

3 DLCM – Università degli Studi di Genova, Genova (GE), luca.martini@edu.unige.it

4 DLCM – Università degli Studi di Genova, Genova (GE), matteo.scaramuzzino@edu.unige.it

5 DIBRIS – Università degli Studi di Genova, Genova (GE), gianni.vercelli@unige.it

6 DIBRIS – Università degli Studi di Genova, Genova (GE), daniele.zolezzi@edu.unige.it

Open Access article distributed under CC BY-NC-ND 4.0
Copyright © Genova University Press



Abstract

Il contributo analizza la convergenza tra Extended Reality (XR), Intelligenza Artificiale Generativa ed Edu-Metaverso, con attenzione agli agenti conversazionali in contesti di apprendimento immersivo e patrimonio culturale. L'obiettivo è ricostruire, a partire da fonti scientifiche recenti, il rapporto tra evoluzione del Metaverso, tecnologie XR, Large Language Models (LLM) e modelli di mediazione didattica. L'approccio adottato è una sintesi critica e comparativa che integra quadro teorico, strumenti, casi di studio e implicazioni operative. Emerge che la Generative AI può abbassare la soglia di accesso alla produzione di contenuti, sostenere storytelling adattivo e personalizzare la mediazione in musei virtuali e ambienti formativi. Si evidenzia inoltre il valore di LLM locali o offline in ambienti protetti, connessi in modo intermittente o non accessibili dall'esterno: modelli specializzati, eseguiti in locale e adattati su knowledge base dedicate, migliorano controllo del dato, continuità del servizio e coerenza di dominio. Il contributo principale è quindi l'identificazione di una pipeline socio-tecnica in cui interoperabilità, grounding della conoscenza, sostenibilità infrastrutturale e sovranità del dato diventano condizioni necessarie per un Edu-Metaverso credibile.

Keywords

Extended Reality, Intelligenza Artificiale Generativa, Edu-Metaverso, Agenti conversazionali, Patrimonio culturale

1. Introduzione

Nel giro di pochi anni il Metaverso è passato da parola-chiave ad alto tasso mediatico a categoria analitica più problematica e stratificata. La fase iniziale, segnata dall'annuncio di Meta e da una forte aspettativa industriale, ha favorito un uso estensivo del termine per ricomprendere

pratiche diverse: realtà aumentata, realtà virtuale, ambienti condivisi, gemelli digitali e piattaforme sociali immersive. Le prime sistematizzazioni della letteratura mostrano tuttavia che il Metaverso non coincide con un singolo prodotto né con una piattaforma unica, ma con un insieme eterogeneo di infrastrutture, dispositivi e linguaggi esperienziali collocati entro il più ampio continuum della Extended Reality (Kye et al., 2021; Tlili et al., 2022).

Parallelamente, la centralità assunta dai sistemi di Intelligenza Artificiale Generativa ha ridefinito le priorità della trasformazione digitale. Se il discorso pubblico del 2021 era dominato dai visori e dai mondi persistenti, gli studi più recenti insistono invece sulla convergenza tra ambienti immersivi, Large Language Models (LLM), generazione multimodale e interfacce conversazionali naturali. Questo slittamento non ha cancellato il Metaverso; ne ha piuttosto ridefinito il baricentro, rendendo più evidente che il valore degli ambienti immersivi dipende anche dalla qualità delle mediazioni intelligenti che li attraversano (Almeman et al., 2025; Chheang et al., 2024).

In ambito educativo, tale convergenza ha prodotto il concetto di Edu-Metaverso: un ecosistema nel quale ambienti virtuali condivisi, identità digitali, oggetti interattivi e pratiche didattiche si integrano con logiche di interoperabilità, collaborazione e personalizzazione. La letteratura evidenzia che l'adozione del Metaverso in educazione non può essere ridotta a un trasferimento tecnologico di aule o campus in 3D; richiede invece modelli pedagogici capaci di sostenere coinvolgimento, continuità fra presenza e distanza e accesso differenziato agli strumenti di creazione (Kye et al., 2021; Wang et al., 2022). Una revisione sistematica recente segnala infatti una crescita delle ricerche che combinano XR, natural language processing, adaptive tutoring e ambienti metaversici, confermando che l'integrazione tra AI e immersività sta diventando un asse strutturale della progettazione educativa (Almeman et al., 2025).

In questo quadro, gli agenti conversazionali basati su LLM si configurano come un punto di intersezione strategico. Possono fungere da guide museali, tutor, narratori adattivi e interfacce di accesso a basi di conoscenza curate, ma introducono anche problemi di affidabilità, costi computazionali, bias e sicurezza. La riflessione più recente li considera quindi non come semplici chatbot inseriti in ambienti 3D, ma come dispositivi di mediazione che devono essere progettati insieme a

obiettivi formativi, vincoli di dominio e strategie di controllo del contenuto (Chheang et al., 2024; Yusuf et al., 2025; De Carolis et al., 2023).

L'obiettivo non è discutere il Metaverso come slogan, ma chiarire quali condizioni rendano significativa la sua applicazione in contesti di apprendimento e mediazione culturale. A partire da tre fonti primarie recenti (Iacono et al., 2023a; Iacono e Vercelli, 2023b; Lorenzoni et al., 2025), l'articolo mette in relazione quadro teorico, tecnologie abilitanti e casi di studio, interrogando soprattutto il ruolo della Generative AI nella riduzione delle soglie di authoring e nella costruzione di interazioni più adattive. Ne deriva una prospettiva che considera l'Edu-Metaverso non come destinazione inevitabile dell'innovazione educativa, ma come ipotesi progettuale che va verificata sul piano pedagogico, infrastrutturale ed etico.

2. Contesto teorico e lavori correlati

2.1 Extended Reality e Metaverso

Una delle principali difficoltà teoriche consiste nel definire il Metaverso senza trasformarlo in un contenitore indistinto. La ricostruzione proposta da Kye et al. distingue quattro direttrici ricorrenti - Augmented Reality, Virtual Reality, Mirror World e Life Logging - mostrando come esse non siano categorie astratte, ma modalità concrete di articolazione fra spazio fisico, dati, rappresentazione e presenza utente (Kye et al., 2021). In questa lettura, il Metaverso appare meno come una piattaforma conclusa e più come un'ecologia di ambienti interoperabili che estende la logica della XR a dimensioni sociali, produttive e culturali.

L'Edu-Metaverso eredita da questa impostazione almeno tre elementi strutturali. Il primo è la continuità tra reale e virtuale: i mondi immersivi non si oppongono all'esperienza materiale, ma la aumentano, la simulano o la riflettono. Il secondo è la centralità dell'identità digitale, che rende possibili persistenza, partecipazione e tracciabilità delle interazioni. Il terzo è l'interoperabilità, intesa non solo come compatibilità tecnica tra piattaforme, ma come condizione per

connettere contenuti, avatar, dispositivi e servizi educativi in un percorso coerente (Wang et al., 2022; Tlili et al., 2022). Una review specificamente dedicata agli avatar nel Metaverso educativo sottolinea inoltre che identità, presenza e sicurezza dei dati non sono variabili secondarie, ma il cuore della qualità esperienziale e della fiducia istituzionale riposta negli ambienti immersivi (Islam e Wang, 2025).

La letteratura più recente invita però a evitare una lettura deterministicamente progressiva. L'adozione del Metaverso in educazione presenta barriere economiche, culturali e infrastrutturali: disponibilità diseguale di dispositivi XR, dipendenza da ecosistemi proprietari, difficoltà nel governare identità multiple e tensione costante fra accessibilità e iper-realismo. Per questo gli studi bibliometrici e di revisione descrivono il Metaverso come uno spazio di possibilità ancora instabile, nel quale il valore formativo dipende dalla qualità del disegno didattico più che dalla sola intensità immersiva (Tlili et al., 2022; Kye et al., 2021).

2.2 Metaverso educativo (Edu-Metaverso)

Il rapporto tra MOOC e Metaverso consente di leggere l'evoluzione dei modelli formativi digitali. La letteratura sull'Edu-Metaverso collega infatti l'eredità dei cMOOC, fondati su connettivismo, risorse aperte e comunità di apprendimento, con modelli più strutturati di erogazione e valutazione tipici degli xMOOC. L'emergenza pandemica ha ulteriormente accelerato questa traiettoria, evidenziando tanto l'utilità della didattica a distanza quanto i limiti di ambienti poco capaci di sostenere presenza sociale e interazione significativa (Wang et al., 2022; Tlili et al., 2022; Iacono e Vercelli, 2023b).

In questo contesto, l'Edu-Metaverso non è soltanto una visualizzazione tridimensionale della didattica online. Esso si configura come ambiente condiviso in cui avatar, spazi simulati, oggetti interattivi e regole di partecipazione possono supportare apprendimento collaborativo, esercitazione contestualizzata e gamification. Il modello proposto da Wang et al. insiste infatti sulla costruzione di un ecosistema, non di una singola applicazione: governance dei dati, continuità tra piattaforme, strumenti di authoring, supporto alla personalizzazione e inclusione degli studenti sono componenti tra loro interdipendenti (Wang et al., 2022). In questa direzione, la systematic review di Almeman et al. rileva che i casi più promettenti sono quelli in cui AI generativa,

analitiche dell'apprendimento e ambienti virtuali vengono integrati in architetture pedagogiche esplicite, anziché sovrapposti come moduli indipendenti (Almeman et al., 2025).

Le pratiche di gamification assumono qui un ruolo metodologico e operativo. Nei contributi esaminati esse non vengono ridotte a punti, badge e classifiche, ma intese come leve per mantenere motivazione, orientare l'esplorazione e differenziare l'esperienza per profili di learner diversi. In questo quadro, la distinzione tra beginner-level creator e advanced-level creator segnala che la sostenibilità dell'Edu-Metaverso dipende anche dall'accesso graduale agli strumenti di produzione: piattaforme visuali, librerie 3D, soluzioni XR semplificate e game engine devono potersi collocare lungo una scala di complessità didatticamente gestibile (Song et al., 2024; Wang et al., 2022; Iacono e Vercelli, 2023b).

Un aspetto decisivo, spesso sottovalutato, è che questa scala di complessità non riguarda solo l'interfaccia tecnica ma anche la governance del corso. Un MOOC immersivo o un ambiente formativo condiviso richiedono infatti gestione delle identità, persistenza delle tracce, strumenti di monitoraggio, politiche di accesso e modelli di valutazione coerenti con il grado di immersività proposto. L'Edu-Metaverso diventa pertanto una questione di integrazione tra piattaforma, curriculum e organizzazione didattica, non un semplice upgrade estetico dell'e-learning tradizionale (Wang et al., 2022; Tlili et al., 2022).

2.3 IA generativa e agenti conversazionali in XR

L'Intelligenza Artificiale Generativa rende più densa la relazione tra immersione e mediazione. Se i primi ambienti XR richiedevano percorsi fortemente pre-scripted, l'integrazione di LLM consente oggi di modellare guide, tutor e personaggi non giocanti capaci di rispondere in linguaggio naturale, adattare il ritmo della spiegazione, supportare il multilinguismo e personalizzare la narrazione. In ambito educativo, questi sistemi hanno mostrato potenziale nel migliorare usability, senso di presenza e motivazione degli studenti, a condizione che l'interazione sia progettata in modo coerente con il contesto didattico (Chheang et al., 2024; Song et al., 2024). Studi recenti sugli agenti pedagogici conversazionali in istruzione superiore mostrano peraltro che la qualità percepita dell'assistente dipende non solo dalla correttezza delle

risposte, ma anche dalla trasparenza del suo ruolo, dalla capacità di scaffolding e dall'allineamento con gli obiettivi formativi (Yusuf et al., 2025).

Nel patrimonio culturale immersivo, gli agenti conversazionali spostano il focus dal semplice accesso a una ricostruzione digitale alla possibilità di instaurare un dialogo situato con il contenuto. L'assistente virtuale non è soltanto un canale informativo, ma un dispositivo di mediazione che può orchestrare storytelling adattivo, guida nello spazio, risposte a domande spontanee e gestione di deviazioni conversazionali senza interrompere l'esperienza. In questa direzione si collocano sia l'esperienza del museo MARTA, sia i più recenti framework che combinano avatar, gesture synthesis e narrativa interattiva in VR (De Carolis et al., 2023; Bao et al., 2024).

Resta tuttavia aperta la questione dell'affidabilità epistemica. Gli LLM tendono a produrre risposte plausibili anche quando non fondate, e questo rischio è particolarmente critico in contesti educativi e museali, dove la credibilità delle informazioni è parte integrante dell'esperienza. La soluzione emergente non è l'abbandono dei modelli generativi, ma il loro grounding in basi di conoscenza curate, la limitazione del retrieval non verificato, il controllo degli intenti e l'uso di fallback conversazionali in grado di evitare allucinazioni o uscite fuori contesto (Chelli et al., 2024; Chheang et al., 2024; De Carolis et al., 2023).

3. Tecnologie e strumenti

Il panorama tecnologico delineato dalle fonti mette in luce una tensione costante tra accessibilità degli strumenti e profondità di personalizzazione. Per i creator con minore esperienza, piattaforme XR guidate, ambienti di authoring low-code e librerie di asset consentono di costruire esperienze aumentate o immersive senza dover affrontare l'intera complessità dei game engine. Per i creator avanzati, invece, motori come Unreal Engine o Unity diventano essenziali quando occorrono controllo fine della scena, integrazione di logiche interattive, uso di fotogrammetria, collegamento a basi dati e gestione di avatar complessi (Wang et al., 2022; Song et al., 2024; Iacono et al., 2023a).

In questo ecosistema Unreal Engine assume un ruolo particolarmente rilevante perché combina rendering in tempo reale, gestione di asset ad alta complessità, navigazione spaziale e supporto a pipeline XR mature. Nelle applicazioni al patrimonio culturale, il passaggio a Unreal Engine 5 è spesso associato non solo a un incremento di qualità visuale, ma a una migliore orchestrazione tra ambiente, avatar e interazione, soprattutto quando la scena deriva da ricostruzioni fotogrammetriche o da digital twin di siti e collezioni (Rodriguez-Garcia et al., 2024; Iacono et al., 2024).

L'integrazione tra avatar e AI conversazionale si concretizza poi attraverso MetaHuman e plugin dedicati, come nel caso di ConvAI. L'avatar non è semplicemente una maschera estetica: diventa interfaccia embodied, capace di sincronizzare testo, voce, espressioni facciali, gesti e locomozione. La letteratura sui virtual agent in VR mostra che persona design, controllo dei parametri del modello, knowledge bank tematiche e mappatura delle azioni verso eventi del motore grafico sono fattori decisivi per mantenere coerenza narrativa e naturalezza della conversazione in tempo reale (Bao et al., 2024; Lorenzoni et al., 2025).

Particolarmente rilevante è la gestione del multilinguismo. Nei sistemi esaminati, il passaggio da una semplice voice interface a una guida realmente plurilingue richiede allineamento tra riconoscimento dell'input, selezione della lingua di output, text-to-speech, sincronizzazione labiale e controllo del comportamento spaziale dell'avatar. L'efficacia dell'agente dipende quindi da una pipeline multimodale completa, in cui la lingua non è un layer accessorio, ma parte del disegno dell'esperienza e dell'accessibilità del contenuto culturale (De Carolis et al., 2023; Lorenzoni et al., 2025).

Un nodo tecnologico crescente riguarda l'esecuzione di LLM in locale o offline. La letteratura sugli edge LLM mostra che il passaggio dal cloud a infrastrutture controllate risponde a esigenze di latenza, sovranità del dato e continuità operativa quando la connettività è limitata o non ammessa (Zheng et al., 2024; Basu e Mahbub, 2026). In questi scenari l'inferenza resta entro il perimetro istituzionale e rende più praticabile l'uso di agenti conversazionali in ambienti protetti.

Le evidenze più solide provengono da domini ad alta sensibilità informativa. Studi su LLM privacy-preserving e on-premise mostrano che modelli aperti eseguiti su hardware locale possono estrarre e

interrogare contenuti specialistici senza far uscire i dati dall'organizzazione (Vaid et al., 2024; Wiest et al., 2024; Woznicki et al., 2025). Pur nati in ambito clinico, questi risultati sono trasferibili a musei, archivi e contesti formativi con collezioni o log sensibili.

Per ambienti educativi e culturali questo tema è rilevante per almeno tre ragioni. La prima è la protezione delle collezioni digitali, dei log di interazione e dei dati eventualmente raccolti da utenti e studenti. La seconda è la resilienza operativa: installazioni museali, laboratori XR, archivi e siti patrimoniali distribuiti possono trovarsi in condizioni di rete instabile, costosa o intenzionalmente segregata. La terza è la possibilità di adattare il modello a un dominio ristretto, addestrandolo o rifinendolo su knowledge base locali, glossari specialistici, corpora curatoriale-didattici e procedure istituzionali. In questo senso, tecniche come LoRA e QLoRA risultano particolarmente strategiche, perché permettono di specializzare modelli aperti con costi computazionali inferiori rispetto al fine-tuning completo, rendendo più realistico l'allestimento di agenti verticali su infrastrutture locali (Hu et al., 2021; Dettmers et al., 2023; Dennstadt et al., 2025).

Da qui emerge un principio di progettazione generale: la Generative AI è utile in XR quando viene inserita in sistemi knowledge-grounded e quando la sua libertà generativa viene bilanciata da vincoli semantici, spaziali e didattici. Basi di conoscenza delimitate, prompt contestuali, controllo degli oggetti di scena e gestione modulare delle lingue non sono semplici dettagli implementativi; rappresentano condizioni architetturali che trasformano un LLM da motore discorsivo generalista a componente affidabile di un ambiente immersivo educativo o museale (Chelli et al., 2024; Chheang et al., 2024; Lorenzoni et al., 2025).

Questa osservazione consente anche di ridimensionare l'idea che la Generative AI semplifichi automaticamente la produzione di contenuti. In realtà, essa sposta il lavoro verso fasi nuove: selezione e pulizia delle fonti, progettazione di prompt e nodi narrativi, manutenzione delle knowledge bank, definizione di fallback sicuri, validazione delle risposte e monitoraggio delle interazioni. Il beneficio per docenti, curatori e designer non è dunque l'eliminazione del lavoro autoriale, ma la possibilità di redistribuirlo verso attività di regia, controllo e adattamento continuo del contenuto (Song et al., 2024; Yusuf et al., 2025).

4. Applicazioni e casi di studio

Uno dei casi più maturi riguarda il Museo Preistorico dei Balzi Rossi, dove una ricostruzione VR già esistente viene arricchita da una guida conversazionale modellata sulla Dame du Cavillon. Il progetto in essere non si limita ad aggiungere un chatbot a uno scenario tridimensionale: costruisce una mediazione incarnata che collega conoscenza archeologica validata, narrazione storicamente coerente, gestione del movimento nello spazio e dialogo multilingue in italiano, inglese e francese. L'esperienza museale si trasforma così in un percorso personalizzabile, nel quale il visitatore può interrogare il sistema, essere accompagnato verso punti di interesse e ricevere risposte contestuali senza perdere continuità immersiva (Iacono et al., 2024; Lorenzoni et al., 2025).

Questa applicazione mostra bene perché il patrimonio culturale sia un laboratorio privilegiato per l'incontro tra XR e Intelligenza Artificiale Generativa. I siti archeologici e i musei virtuali richiedono infatti un equilibrio delicato tra accuratezza scientifica, accessibilità pubblica e intensità narrativa. Una guida conversazionale knowledge-grounded consente di rispettare questo equilibrio meglio di un'interfaccia soltanto manuale, perché può adattare il livello di dettaglio, recuperare curiosità del visitatore, sostenere l'inclusione linguistica e trasformare la visita in una forma di apprendimento situato (De Carolis et al., 2023; Lorenzoni et al., 2025). Risultati coerenti emergono anche da studi recenti su musei VR e heritage engagement, nei quali la Intelligenza Artificiale Generativa viene usata per creare assistenti capaci di rafforzare partecipazione, inclusione e coinvolgimento esperienziale del visitatore senza rinunciare alla curatela dei contenuti (Ariya et al., 2025; Suicmez et al., 2025).

Sul versante educativo, un diverso asse applicativo emerge dai MOOC gamificati e dagli ambienti formativi immersivi progettati per sostenere partecipazione attiva, supporto algoritmico e produzione guidata di contenuti. In questi scenari il Metaverso non è pensato come replica spettacolare del mondo fisico, ma come ambiente capace di combinare modelli 3D, immagini a 360 gradi, attività interattive e strumenti generativi sottoposti a curatela docente. L'uso di sistemi come ChatGPT non elimina il ruolo del docente; lo sposta piuttosto verso compiti di

revisione, orchestrazione e validazione pedagogica (Wang et al., 2022; Song et al., 2024; Iacono e Vercelli, 2023b).

L'orizzonte più promettente sta probabilmente nella convergenza tra questi due assi: da un lato ambienti culturali dotati di agenti conversazionali, dall'altro piattaforme formative che integrano immersività, ludicizzazione e tutoring adattivo. Progetti come LearningverseVR indicano che la co-progettazione tra Intelligenza Artificiale Generativa e VR può sostenere un apprendimento più interattivo e memorabile, soprattutto quando contenuto, valutazione e storytelling sono progettati come parti della stessa esperienza, non come moduli indipendenti (Song et al., 2024).

La trasferibilità di tali esperienze dipende tuttavia dal grado di modularità delle soluzioni impiegate. Un museo può disporre di un forte ancoraggio narrativo e di un corpus limitato di contenuti verificati; un corso universitario o un MOOC aperto devono invece gestire discipline, livelli e pubblici molto più variabili. Ne consegue che il valore dei casi di studio non risiede solo nel loro successo locale, ma nella capacità di offrire pattern riusabili: grounding della conoscenza, interazione vocale guidata, oggetti spaziali vincolati, percorsi narrativi ramificati e integrazione tra attività valutative e supporto conversazionale (Lorenzoni et al., 2025; Song et al., 2024).

5. Discussione

Dal punto di vista educativo, la principale promessa della convergenza tra XR e Intelligenza Artificiale Generativa è la possibilità di passare da ambienti immersivi prevalentemente contemplativi a spazi dialogici e adattivi. Un agente conversazionale ben progettato può fungere da ponte tra complessità del contenuto e bisogni del singolo utente, facilitando orientamento, rinforzo, curiosità ed engagement. Questa funzione diventa particolarmente rilevante in contesti eterogenei, come musei, corsi universitari internazionali o piattaforme aperte, nei quali il pubblico presenta livelli molto diversi di alfabetizzazione disciplinare e digitale (Wang et al., 2022; Yusuf et al., 2025). Anche la questione della embodied presence degli avatar educativi torna qui in primo piano: quando la mediazione

conversazionale è affidata a rappresentazioni credibili e contestualizzate, l'interazione può risultare più naturale, ma cresce parallelamente il bisogno di protocolli chiari su identità digitale, comportamento e responsabilità istituzionale (Islam e Wang, 2025).

Tale potenziale, però, dipende da precise condizioni di sostenibilità tecnica e organizzativa. Le fonti mostrano che l'adozione dell'Edu-Metaverso richiede hardware adeguato, reti stabili, strumenti di authoring accessibili, modelli di manutenzione dei contenuti e politiche per evitare nuove forme di digital divide. Anche quando l'accesso mobile o web riduce la dipendenza dai visori, rimangono i costi legati alla produzione di asset, alla gestione dei servizi AI, all'aggiornamento delle basi di conoscenza e al supporto agli utenti. La sostenibilità non riguarda quindi solo l'efficienza tecnologica, ma la capacità istituzionale di mantenere nel tempo esperienze complesse e verificabili (Tlili et al., 2022; Wang et al., 2022; Almeman et al., 2025). In quest'ottica, l'opzione offline o on-premise rappresenta anche una forma di continuità didattica e curatoriale: se l'interazione conversazionale dipende da connessioni esterne non sempre disponibili, l'esperienza immersiva rischia di interrompersi proprio nei contesti in cui dovrebbe apparire più fluida e affidabile.

Un secondo nodo critico riguarda etica, identità e sicurezza. Nei mondi immersivi, corpo digitale, voce, dati comportamentali e cronologia delle interazioni diventano parte dell'esperienza formativa; ciò espone utenti e istituzioni a rischi di sorveglianza, molestie, abuso identitario e manipolazione. Le discussioni emerse nella letteratura sull'Edu-Metaverso mostrano che il problema non è marginale, ma strutturale: la protezione dell'avatar, la possibilità di revoca dell'immagine digitale, la moderazione delle interazioni e la trasparenza nell'uso dei modelli generativi devono essere trattate come requisiti progettuali e non come correzioni a posteriori (Wang et al., 2022; Tlili et al., 2022; Islam e Wang, 2025).

Infine, l'ingresso degli LLM in ambienti XR obbliga a ridefinire il concetto stesso di affidabilità didattica. Se in passato la qualità di un ambiente immersivo si misurava soprattutto in termini di resa visiva, oggi occorre valutare anche correttezza delle risposte, tracciabilità delle fonti, capacità di gestire prompt impropri e robustezza delle strategie anti-hallucination. La combinazione fra basi di conoscenza curate, controllo degli oggetti e fallback conversazionali è una direzione

convincente, ma non sufficiente: servono protocolli di valutazione più sistematici, con metriche pedagogiche, test di usabilità, misure di presenza e controlli sulla correttezza informativa in scenari reali (Chelli et al., 2024; Chheang et al., 2024; Yusuf et al., 2025). Le analisi più recenti sugli agenti pedagogici e sugli ambienti museali immersivi convergono infatti sull'esigenza di valutare insieme performance del modello, esperienza utente e valore formativo, evitando di assumere che la sola presenza di AI generativa produca automaticamente migliori esiti didattici (Yusuf et al., 2025; Suicmez et al., 2025).

Da questa prospettiva, la questione dei modelli locali/offline va trattata come una dimensione strategica dell'Edu-Metaverso e non come una semplice variante infrastrutturale. Laddove l'uso di API esterne può essere sufficiente per prototipi o contesti a bassa criticità, installazioni museali permanenti, ambienti scolastici protetti, archivi digitali e sistemi di supporto a dati sensibili possono richiedere un maggiore controllo su esecuzione, logging, aggiornamento e accesso al modello. La letteratura recente insiste sul fatto che gli open LLM distribuiti su hardware locale aumentano controllo e personalizzazione, ma richiedono competenze tecniche, manutenzione e politiche di sicurezza adeguate (Dennstadt et al., 2025; Basu e Mahbub, 2026). Per la ricerca futura, questo implica affiancare alla valutazione pedagogica anche metriche di autonomia infrastrutturale, sicurezza del deployment locale, costo di specializzazione del modello e robustezza in assenza di rete.

Il punto più interessante, per il nostro tema, è che localizzazione e specializzazione possono procedere insieme. Un agente conversazionale per un museo, per un campus XR o per un archivio didattico non ha necessariamente bisogno della massima generalità di un modello cloud: può trarre vantaggio da modelli più controllabili, adattati a un corpus limitato e ottimizzati per compiti specifici come guida narrativa, supporto FAQ, spiegazione di oggetti o tutoring disciplinare. L'adozione di tecniche di parameter-efficient fine-tuning rende questo scenario più plausibile, poiché consente di mantenere il modello di base in locale e di aggiornare solo componenti leggere legate al dominio, senza dover ogni volta ridistribuire l'intera rete neurale (Hu et al., 2021; Dettmers et al., 2023).

Un'agenda di ricerca coerente dovrebbe integrare tre livelli: modello, infrastruttura e dominio. Servono tecniche sostenibili per inferenza

locale e adattamento specialistico, ambienti sicuri capaci di operare anche con rete segregata e procedure di validazione affidabili per musei, scuole e archivi culturali (Zheng et al., 2024; Dennstadt et al., 2025; Basu e Mahbub, 2026).

In questo quadro, la scelta tra deployment locale ed ecosistemi cloud non dovrebbe essere considerata in termini rigidamente dicotomici. Il problema progettuale consiste piuttosto nel determinare quali funzioni debbano rimanere interne, quali possano essere affidate a servizi esterni e quali meccanismi di adattamento consentano di aggiornare o specializzare il sistema senza esporre dataset, prompt sensibili e cronologie di interazione. Tale distinzione è particolarmente rilevante negli ambienti immersivi, nei quali i dati trattati non comprendono soltanto contenuti testuali, ma anche voce, comportamenti, sequenze di navigazione, preferenze, log operativi e, in alcuni casi, informazioni biometriche o spaziali. Gli studi sul deployment locale indicano che protezione dei dati, apertura scientifica e utilità operativa possono coesistere, purché l'architettura definisca esplicitamente modalità di accesso, registrazione delle attività, gestione degli output e responsabilità sugli aggiornamenti del modello (Vaid et al., 2024; Wiest et al., 2024; Woznicki et al., 2025).

6. Conclusioni

La sintesi proposta mostra che XR, Edu-Metaverso e Intelligenza Artificiale Generativa stanno convergendo verso ambienti nei quali l'immersione non è più soltanto una qualità spaziale, ma una forma di interazione guidata da agenti conversazionali, contenuti adattivi e infrastrutture interoperabili. Nel corpus esaminato emergono con chiarezza tre assi complementari: la definizione del Metaverso come ecosistema XR, la necessità di una mediazione pedagogica esplicita per l'Edu-Metaverso e la crescente rilevanza di agenti embodied e knowledge-grounded nei contesti culturali e formativi (Wang et al., 2022; Tlili et al., 2022; Chheang et al., 2024; De Carolis et al., 2023).

Le direzioni future di ricerca riguardano la costruzione di pipeline più accessibili, la valutazione empirica degli effetti su apprendimento e

presenza, modelli di governance dei dati e strategie di grounding che riducano le allucinazioni. In questo quadro assume rilievo anche la disponibilità di LLM locali o offline, adattabili a domini specifici e impiegabili in ambienti protetti o con connettività intermittente, dove privacy e continuità del servizio sono parte del valore didattico e culturale del sistema.

Riferimenti bibliografici

- Almeman, K., F. El Ayeb, M. Berrima, B. Issaoui, H. Morsy. 2025. Integration of AI and Metaverse in Education: A Systematic Literature Review. *Applied Sciences* 15, 2: 863. DOI: <https://doi.org/10.3390/app15020863>.
- Ariya, P., S. Khanchai, K. Intawong, K. Puritat. 2025. Enhancing Textile Heritage Engagement Through Generative AI-Based Virtual Assistants in Virtual Reality Museums. *Computers & Education: X Reality* 7, 100112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2025.100112>.
- Bao, Y., N. Gao, D. Weng, J. Chen, Z. Tian. 2024. MuseGesture: A Framework for Gesture Synthesis by Virtual Agents in VR Museum Guides. In *2024 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality Adjunct (ISMAR-Adjunct)*, 337-338. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISMAR-Adjunct64951.2024.00079>.
- Basu, K., I. Mahbub. 2026. Zero-Trust Secure System and Communication Architecture to Support LLMs on the Edge Cloud Continuum (LLM-EC2). In *Proceedings of 1st GENZERO Workshop*. Springer, Singapore, 206-215. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-95-1050-4_25.
- Chelli, M., et al. 2024. Hallucination Rates and Reference Accuracy of ChatGPT and Bard for Systematic Reviews: Comparative Analysis. *Journal of Medical Internet Research* 26, e53164. DOI: <https://doi.org/10.2196/53164>.

- Chheang, V., et al. 2024. Towards Anatomy Education with Generative AI-based Virtual Assistants in Immersive Virtual Reality Environments. In *2024 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and eXtended and Virtual Reality (AIxVR)*, 21-30. DOI: <https://doi.org/10.1109/AIxVR59861.2024.00011>.
- De Carolis, B., N. Macchiarulo, M. A. Bochicchio. 2023. AI-Assisted Virtual Reality for Cultural Heritage Education: The Experience of the MARTA Museum. In *2023 6th Experiment@ International Conference (exp.at'23)*, 152-156. DOI: <https://doi.org/10.1109/exp.at2358782.2023.10545657>.
- Dennstadt, F., J. Hastings, P. M. Putora, M. Schmerder, N. Cihoric. 2025. Implementing Large Language Models in Healthcare While Balancing Control, Collaboration, Costs and Security. *npj Digital Medicine* 8, 143. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41746-025-01476-7>.
- Dettmers, T., A. Pagnoni, A. Holtzman, L. Zettlemoyer. 2023. QLoRA: Efficient Finetuning of Quantized LLMs. *arXiv:2305.14314*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.14314>.
- Hu, E. J., Y. Shen, P. Wallis, Z. Allen-Zhu, Y. Li, S. Wang, L. Wang, W. Chen. 2021. LoRA: Low-Rank Adaptation of Large Language Models. *arXiv:2106.09685*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2106.09685>.
- Iacono, S., et al. 2024. Virtual Reality in Cultural Heritage: A Setup for Balzi Rossi Museum. *Applied Sciences* 14, 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14093562>.
- Iacono, Saverio, Daniele Zolezzi, Gianni Vercelli. 2023a. Metaverse, a Year After: Evolution of XR Tools and Generative-AI. In *2023 IEEE International Conference on Metrology for eXtended Reality, Artificial Intelligence and Neural Engineering (MetroXRINE)*, 34-39. DOI: <https://doi.org/10.1109/MetroXRINE58569.2023.10405700>.
- Iacono, Saverio, Gianni Vercelli. 2023b. How to Prepare High-Level Massive Online Open Courses for the Metaverse: Tools and Needs. *Engineering Proceedings* 38, 2. DOI: <https://doi.org/10.3390/engproc2023038002>.

- Islam, M. Z., G. Wang. 2025. Avatars in Educational Metaverse: A Review of Their Roles, Applications, Opportunities, and Data Security Concerns. *Smart Learning Environments* 12, 19. DOI: <https://doi.org/10.1186/s42492-025-00196-9>.
- Kye, B., N. Han, E. Kim, Y. Park, S. Jo. 2021. Educational Applications of Metaverse: Possibilities and Limitations. *Journal of Educational Evaluation for Health Professions* 18, 32. DOI: <https://doi.org/10.3352/jeehp.2021.18.32>.
- Lorenzoni, G., M. Scaramuzzino, S. Iacono, L. Martini, D. Zolezzi, G. Vercelli. 2025. Real-Time Multilingual Museum Guidance with ConVAI and Unreal Engine 5. In *2025 IEEE International Conference on Cyber Humanities*, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEE-CH65308.2025.11279512>.
- Rodriguez-Garcia, B., H. Guillen-Sanz, D. Checa, A. Bustillo, M. A. Larrazabal. 2024. A Review of 3D Reconstructions and Immersive Virtual Reality Applications in Cultural Heritage. *Multimedia Tools and Applications*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18700-3>.
- Song, Y., K. Wu, J. Ding. 2024. Developing an Immersive Game-Based Learning Platform with Generative Artificial Intelligence and Virtual Reality Technologies - LearningverseVR. *Computers & Education: X Reality* 4, 100069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2024.100069>.
- Suicmez, I., F. Altinay, G. Dagli, H. Zeng, R. Shadiev, D. Islek, I. Danju, M. Yilmaz, Z. Altinay. 2025. Museum Experiential Learning in the Metaverse Through the Lens of Generative AI. *Smart Learning Environments* 12, 23. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40561-025-00404-2>.
- Tlili, A., R. Huang, B. Shehata, D. Liu, J. Zhao, A. H. S. Metwally, H. Wang, M. Denden, A. Bozkurt, L.-H. Lee, et al. 2022. Is Metaverse in Education a Blessing or a Curse: A Combined Content and Bibliometric Analysis. *Smart Learning Environments* 9, 24. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40561-022-00205-x>.
- Vaid, A., S. Q. Duong, J. Lampert, P. Kovatch, E. Argulian, L. Croft, S. Lerakis, M. Goldman, R. Khera. 2024. Local Large Language Models

- for Privacy-Preserving Accelerated Review of Historic Echocardiogram Reports. *Journal of the American Medical Informatics Association* 31, 9: 2097-2102. DOI: <https://doi.org/10.1093/jamia/ocae085>.
- Wang, M., H. Yu, Z. Bell, X. Chu. 2022. Constructing an Edu-Metaverse Ecosystem: A New and Innovative Framework. *IEEE Transactions on Learning Technologies* 15, 6: 685-696. DOI: <https://doi.org/10.1109/TLT.2022.3210828>.
- Wiest, I. C., D. Ferber, J. Zhu, M. van Treeck, S. K. Meyer, R. Juglan, Z. I. Carrero, D. Paech, J. Kleesiek, M. P. Ebert, D. Truhn, J. N. Kather. 2024. Privacy-Preserving Large Language Models for Structured Medical Information Retrieval. *npj Digital Medicine* 7, 257. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01233-2>.
- Woznicki, P., C. Laqua, I. Fiku, A. Hekalo, D. Truhn, S. Engelhardt, J. Kather, S. Foersch, T. Akinci D'Antonoli, D. Pinto dos Santos, B. Baessler, F. C. Laqua. 2025. Automatic Structuring of Radiology Reports with On-Premise Open-Source Large Language Models. *European Radiology* 35: 2018-2029. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00330-024-11074-y>.
- Yusuf, H., A. Money, D. Daylamani-Zad. 2025. Pedagogical AI Conversational Agents in Higher Education: A Review of Current Research and Framework for Future Practice. *Educational Technology Research and Development*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11423-025-10447-4>.
- Zheng, Y., Y. Chen, B. Qian, X. Shi, Y. Shu, J. Chen. 2024. A Review on Edge Large Language Models: Design, Execution, and Applications. *arXiv:2410.11845*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.11845>.