



UNIVERSITÀ
DI TRENTO

www.xydigitale.it

Year X, January - December 2025
Anno X, Gennaio - Dicembre 2025

*Critical review of studies
on the representation
of architecture
and use of the image
in science and art*

*Rassegna critica di studi
sulla rappresentazione
dell'architettura
e sull'uso dell'immagine
nella scienza e nell'arte*

16

**EVOLVING DRAWINGS,
PROJECTS, AND
SURVEYS**

**DISEGNI,
PROGETTI E RILIEVI
IN EVOLUZIONE**

Founder / Fondatore
Roberto de Rubertis

Scientific Direction / Direzione scientifica
Giovanna A. Massari

Scientific Committee / Comitato Scientifico
Lucio Altarelli, Paolo Belardi, Fabio Bianconi, Alessandra Cirafici, Gianni Contessi,
Antonella Di Luggo, Edoardo Dotto, Francesca Fatta, Fabrizio Gay,
Paolo Giandebiaggi, Francesco Maggio, Carlos Montes Serrano,
Philippe Nys, Franco Purini, Fabio Quici, Livio Sacchi, Rossella Salerno,
José Antonio Franco Taboada, Marco Tubino, Ornella Zerlenga

Editorial Direction / Direzione editoriale
Elena Casartelli, Fabio Luce, Cristina Pellegatta, Cristiana Volpi

Editorial Staff / Redazione
Margherita Parrilli, Lorella Pizzonia, Roberta Vitale

Contributor / Collaborazione
Francesco Fuggini

Scientific reviewers of the submitted papers / Revisori scientifici dei testi ricevuti
Giuseppe Amoruso, Leonardo Baglioni, Carlo Bianchini, Pierfederico Calari,
Alessandro Castagnaro, Santi Centineo, Enrico Cicalò, Luigi Cocchiarella, Daniele Colistra,
Mariella Dell'Aquila, Antonella Di Luggo, Tommaso Empler, Francesca Fatta, Marco Filippucci,
Alessandro Franceschini, Valeria Menchetelli, Leonardo Paris, Roberta Spallone

Editorial Office / Redazione
Università degli Studi di Trento – Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica
via Mesiano, 77 - 38123 Trento
tel. +39 0461 282669
www.dicam.unitn.it

Cover.	Marco Falsetti, <i>Re-ruined Rome</i> , ink on watercolor paper, 2025. © Marco Falsetti. <i>The drawing is part of a series dedicated to the future ruins of the most significant buildings in contemporary Rome. As in Piranesi's most famous views, the architectural element – in its role as a ruin – is taken as a starting point for a reflection on the monumental legacy. The drawing deliberately omits references to the circumstances that produced the ruin or to technological elements that might suggest a temporal contextualization. Although it is the ruin of a modern building, the scene is set in a landscape sensitively close to Piranesi's Rome, even evoking its picturesque features, such as the Pinelli-esque chariot, a fragment of an ancient past or a distant future.</i>
In copertina.	Marco Falsetti, <i>Roma nuove rovine</i> , china su carta acquerellata, 2025. © Marco Falsetti. <i>Il disegno è parte di una serie dedicata alle rovine future degli edifici più significativi della Roma contemporanea. Come nelle più celebri vedute piranesiane, il dato architettonico – nella sua valenza di rovina – è assunto come spunto di partenza per una riflessione sull'eredità monumentale. Il disegno omette volutamente riferimenti alle circostanze che hanno prodotto la rovina o a elementi tecnologici in grado di suggerire una contestualizzazione temporale. Pur trattandosi del rudere di un edificio della modernità, la scena è ambientata in un paesaggio vicino, per sensibilità, alla Roma piranesiana, della quale rievoca anche i caratteri pittoreschi come il carro di pinelliana memoria, frammento di un passato antico o di un futuro remoto.</i>
XY:	<i> rassegna critica di studi sulla rappresentazione dell'architettura e sull'uso dell'immagine nella scienza e nell'arte = Critical review of studies on the representation of architecture and use of the image in science and art – A. 10, n. 16 (gen.-dic. 2025) = Y. 10, no. 16 (Jan.-Dec. 2025)</i> Trento: Università degli Studi di Trento; 2016 - . - v. : ill.; 30 cm. – Annuale ISSN (online): 2499-8346 ISBN (online): 978-88-5541-164-6 DOI: http://dx.doi.org/10.15168/xy.v10i16 Università degli Studi di Trento via Calepina, 14 - 38122 Trento tel. +39 0461 283016 - 281722 casaeditrice@unitn.it
	
	Except where otherwise noted, contents on this journal are licensed with a Creative Commons Attribution – Share Alike 4.0 International License Eccetto ove diversamente specificato, i contenuti della rivista sono rilasciati con Licenza Creative Commons Attribuzione – Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale

Contents / Indice

4	<i>E.C., F.L., G.A.M., M.P., C.P., L.P., R.C.V., C.V.</i>	Editorial. A Necessary Adaptation Editoriale. Un adattamento necessario
10	<i>Franco Purini</i>	Drawing as Soul and Life / Il disegno come anima e vita
12	<i>Michele Emmer</i>	Drawing Hyperspace. From Pencil to Computer Graphics Disegnare l’iperspazio. Dalla matita alla <i>Computer graphics</i>
28	<i>Fabio Quici</i>	From Vitruvian <i>Firmitas</i> to Iconic Survival: OMA’s Netherlands Dance Theatre and the Afterlife of Architecture in Images / Dalla <i>firmitas</i> vitruviana alla sopravvivenza dell’architettura nelle sue testimonianze iconografiche: il Teatro nazionale di danza a L’Aia di OMA
44	<i>Laura N. Ferlito Graziano Testa</i>	Schinkel’s <i>Lehrbuch</i> . A Resilient ‘Form’ of Thought Il <i>Lehrbuch</i> di Schinkel. Una “forma” di pensiero resiliente
60	<i>Giulia Lazzaretto</i>	Abstract Fragments: The Transgression of Language in the Representational Logics of Zaha Hadid / Frammenti astratti: la trasgressione del linguaggio nelle logiche rappresentative di Zaha Hadid
76	<i>Hyun-Guk Ryu</i>	Visualising Power in Pyongyang: Political Architecture from Juche to Green / Visualizzare il potere a Pyongyang: l’architettura politica dalla Juche alla <i>green architecture</i>
96	<i>Valentina Castagnolo Anna C. Maiorano</i>	Images of the Survey: Interpreting Architecture between the Perceived and the Inaccessible / Le immagini del rilievo per una lettura dell’architettura tra il percepito e l’inaccessibile
114	<i>Fabrizio Banfi Elena Dellù Francesca R. Paolillo Diego Blanco</i>	From Buried Time to the Resilient Image: The Neanderthal Man and the Lamalunga Cave / Dal tempo sepolto all’immagine resiliente: l’Uomo di Neanderthal e la Grotta di Lamalunga
136	<i>Francesca Gasparetto</i>	Drawing for Art Conservation: A Possible Evolution of Its Language Il disegno per la conservazione delle opere d’arte: una possibile evoluzione del suo linguaggio
154	<i>Cesare Battelli Giovanni Pirari</i>	<i>Imago Resiliens</i> . Signs between the Visible and the Invisible in Artificial Imagination / <i>Imago Resiliens</i> . I segni tra visibile e invisibile nell’immaginazione artificiale
174	<i>Gabriele Casarano</i>	From Drawing to the Sensitive Model: The Epistemology of Data in Digital Architectural and Urban Representation Dal disegno al modello sensibile. Epistemologia del dato nella rappresentazione digitale architettonica e urbana
186	<i>XY 16 2025</i>	The Competition for the Cover Image Il concorso per l’immagine di copertina

From Buried Time to the Resilient Image: The Neanderthal Man and the Lamalunga Cave

Fabrizio Banfi, Elena Dellù, Francesca Romana Paolillo, Diego Blanco



Within the karst depths of the Murgia plateau, the Lamalunga Cave serves as a natural sanctuary that has preserved the Altamura Man for over 150,000 years. This *Homo neanderthalensis*, embedded in a calcitic matrix and coated with coralloid formations, represents one of the most significant cases for paleoanthropological research worldwide. The most recent investigations (2025) mark a turning point: the integration of digital surveying and ground-penetrating radar (GPR) has enabled mapping of the fracture network and the stratigraphy of deposits, defining relationships between voids and solids and identifying discontinuities within the karst system. The analysis of geophysical anomalies has enabled the detection of volumes exhibiting anomalous behavior, interpretable as secondary cavities or occluded conduits, making it possible – for the first time since the discovery – to hypothesize the configuration of the cave’s original accesses. In this context, representation is no longer a simple replication of reality but becomes a cognitive environment in which scientific data is translated into spatial experience. Memory emerges as a stratified dimension: on the one hand, a mineral memory, inscribed in the rock and decoded as a digital palimpsest; on the other, an embodied sensory memory, in which spatiality and proxemics contribute to the construction of an immersive ecosystem. The findings thus transform into resilient images: informational entities capable of moving across digital environments, adapting to technological languages, and sedimenting as collective memory. Representation, therefore, becomes both a critical and operational tool, capable of redefining the paradigms of knowledge and access to inaccessible heritage. Buried time is not replaced but made interpretable through digital mediation that amplifies its meanings, making the past a shareable experience in the present.

Keywords: immersive representation, inaccessible heritage, virtual archaeology.

1. From Deep Time to Virtual Archaeology: Representing the Inaccessible

In recent decades, archaeology and palaeo-anthropology have undergone a profound transformation driven by the systematic introduction of advanced digital technologies into the processes of documenting, analysing, and communicating cultural and scientific heritage. Virtual archaeology, initially conceived as a support tool for visualization and three-dimensional reconstruction of excavation contexts, has progressively established itself as an autonomous and transdisciplinary research field, capable of influencing the very ways knowledge is produced (Reilly 1991; Champion 2021; Huggett 2020). This paradigm shift has redefined the concept of excavation, shifting the focus from the mere removal of material to the complex management of digital information and the simulation of interpretative processes within immersive environments. The spread of integrated digital surveying, high-resolution 3D modelling, dig-

ital twins, and extended reality environments has enabled scientific access to fragile, remote, or physically inaccessible sites, opening new forms of mediation between raw data, critical interpretation, and public engagement. At the same time, the study of Neanderthals has undergone a radical renewal thanks to advances in genetics, computational morphometrics, archaeology, and archaeometry, revealing a complex, adaptable, and culturally articulated species, far removed from outdated evolutionary stereotypes (Lari, Di Vincenzo, Borsato et al. 2015; Di Vincenzo, Lari, Borsato et al. 2017; Caramelli, Lari, Rizzi et al. 2010). Major European sites – from La Chapelle-aux-Saints to La Ferrassie, from Krapina to Vindija, and up to Shanidar – have provided fundamental data for understanding Neanderthal biological and behavioral evolution, while also highlighting the limitations of traditional investigation methods, especially in contexts where the preservation of remains imposes strict constraints on access and handling. It is within this frame-



Dal tempo sepolto all’immagine resiliente: l’Uomo di Neanderthal e la Grotta di Lamalunga

Fabrizio Banfi, Elena Dellù, Francesca Romana Paolillo, Diego Blanco

Nel ventre carsico dell’altopiano murgese, la Grotta di Lamalunga si configura come un santuario naturale che, da oltre 150.000 anni, custodisce l’Uomo di Altamura. Questo *Homo neanderthalensis*, inglobato in una matrice calcitica e rivestito da formazioni coralloidi, rappresenta uno dei casi più rilevanti per la ricerca paleoantropologica a livello globale. Le indagini più recenti (2025) hanno segnato un punto di svolta: l’integrazione tra rilievo digitale e sistemi georadar (GPR) ha consentito di mappare il quadro fessurativo e la stratigrafia dei depositi, definendo i rapporti tra vuoti e pieni e individuando le discontinuità del sistema carsico. L’analisi delle anomalie geofisiche ha permesso di identificare volumi a comportamento anomalo, interpretabili come cavità secondarie o condotti occlusi, rendendo possibile – per la prima volta dalla scoperta – formulare un’ipotesi sulla configurazione degli accessi originari alla grotta. In questo contesto, la rappresentazione non è più una semplice replica del reale, ma si configura come un ambiente cognitivo in cui il dato scientifico viene tradotto in esperienza spaziale. La memoria emerge come una dimensione stratificata: da un lato, una memoria minerale, inscritta nella roccia e decodificata come palinsesto digitale; dall’altro, una memoria sensoriale (*embodied memory*), in cui la spazialità e la prossemica contribuiscono alla costruzione di un ecosistema immersivo. I reperti si trasformano così in immagini resilienti: entità informative capaci di attraversare ambienti digitali, adattarsi ai linguaggi tecnologici e sedimentarsi come memoria collettiva. La rappresentazione diventa quindi uno strumento critico e operativo, capace di ridefinire i paradigmi della conoscenza e della fruizione del patrimonio inaccessible. Il tempo sepolto non viene sostituito, ma reso interpretabile attraverso una mediazione digitale che ne amplifica i significati, rendendo il passato un’esperienza condivisibile nel presente.

Parole chiave: archeologia virtuale, patrimonio inaccessible, rappresentazione immersiva.

1. Dal tempo profondo all’archeologia virtuale: rappresentare l’inaccessible

Negli ultimi decenni, l’archeologia e la paleo-anthropologia hanno attraversato una profonda trasformazione, determinata dall’introduzione sistematica di tecnologie digitali avanzate nei processi di documentazione, di analisi e di comunicazione del patrimonio culturale e scientifico. L’archeologia virtuale, inizialmente concepita come supporto alla visualizzazione e alla restituzione tridimensionale dei contesti di scavo, si è progressivamente affermata come ambito di ricerca autonomo e transdisciplinare, capace di incidere sulle modalità stesse di produzione della conoscenza (Reilly 1991; Champion 2021; Huggett 2020). Questo mutamento di paradigma ha ridefinito il concetto di scavo, spostando l’attenzione dalla mera rimozione della materia alla gestione complessa dell’informazione digitale e alla simulazione dei processi interpretativi in ambienti immersivi. La diffusione del rilievo digitale integrato, della modellazione tridimensionale ad alta ri-

soluzione, dei gemelli digitali e degli ambienti di realtà estesa ha reso possibile l’accesso scientifico a siti fragili, remoti o fisicamente inaccessiblei, inaugurando nuove forme di mediazione tra il dato grezzo, l’interpretazione critica e la fruizione pubblica. Parallelamente, lo studio dei Neanderthal ha conosciuto una fase di rinnovamento radicale grazie ai progressi della genetica, della morfometria computazionale, dell’archeologia e dell’archeometria, che hanno restituito il profilo di una specie complessa, adattabile e culturalmente articolata, ben lontana dai vecchi stereotipi evolutivi (Lari, Di Vincenzo, Borsato et al. 2015; Di Vincenzo, Lari, Borsato et al. 2017; Caramelli, Lari, Rizzi et al. 2010). I grandi siti europei – da La Chapelle-aux-Saints a La Ferrassie, da Krapina a Vindija, fino a Shanidar – hanno fornito dati fondamentali per la comprensione dell’evoluzione biologica e comportamentale dei Neanderthal, ma hanno anche evidenziato i limiti delle metodologie tradizionali di indagine, soprattutto nei contesti in

work that the Lamalunga Cave, located in the karst core of the Alta Murgia plateau in Apulia (fig. 1), finds its place. Discovered in 1993, the cave preserves the Altamura Man, the most archaic and complete Neanderthal individual currently known worldwide, whose remains are embedded within a complex system of galleries and shafts (fig. 2). The significance of the site lies not only in the skeletal remains themselves but also in the extraordinary convergence of geological phenomena and taphonomic processes that have sealed the body within a calcitic formation for over 150,000 years (Agostini 2010; Giacobini, Tagliacozzo, Manzi 2010; Branca, Voltaggio 2010).

Lamalunga is not merely a discovery site; it is a node of relationships between the surface and the underground world, between natural events and human actions, between the visible and the invisible. The physical inaccessibility of the context – essential for its strict protection and for preserving an extremely delicate microclimate – constitutes the starting point of a knowledge process grounded in mediation. Here, the Science of Representation assumes a central role as a critical device, capable of bridging the rigidity of stone and the fluidity of digital data, allowing deep time to be investigated through models that go beyond mere visual documentation and become tools for spatial and predictive analysis. The contribution of this study lies in integrating geophysical data, digital modelling, and immersive environments into a single interpretative framework, capable of transforming the invisible into an interrogable spatial scenario.

Representations of the Lamalunga Cave, although constrained by the site's inaccessibility, are part of a broader tradition of documenting Mediterranean karst cavities. Over time, this tradition has undergone a significant evolution, moving from manual surveys to advanced digital systems, with important implications for the morphological understanding of hypogeal environments.

In this context, it is essential to emphasize that representation is not limited to a descriptive function but serves as a true medium capable of shaping knowledge and connecting the var-



ious disciplines involved. Through interpretative practice, it enables the emergence of relationships between data and space that are not immediately readable in raw data, thus contributing to a more articulated and informed understanding of the analysed context.

2. State of the Art and the Transition toward the Interpretative Digital Twin

While building upon previous studies (Banfi, Dellù, Stanga et al. 2023; Banfi, Dellù, Cacudi et al. 2025), this contribution is distinguished by its critical approach to data integration and its emphasis on the construction of dynamic interpretative scenarios. Research conducted at the Lamalunga Cave over the past five

Figure 1
Lamalunga Cave – Views of the cave's only entrance within the Murgia karst landscape (top left); access and initial descent into the cavity (top right); narrow passages connecting the different chambers and main survey, study, and cataloguing activities of faunal remains (centre); entrance and apse of the chamber where the Neanderthal remains lie (bottom).
Photographs and graphic processing by Fabrizio Banfi.

Figura 1
La Grotta di Lamalunga – Vedute dell'ingresso della grotta nel paesaggio carsico della Murgia (in alto a sinistra); l'accesso e le prime fasi di discesa all'interno della cavità (in alto a destra); i passaggi più angusti che collegano i diversi ambienti della grotta e le principali operazioni di rilievo, studio e catalogazione dei resti faunistici (al centro); l'ingresso e l'abside dell'Uomo in cui giacciono i resti dell'Uomo di Neanderthal (in basso).
Fotografie ed elaborazione grafica a cura di Fabrizio Banfi.

Figura 2
Resti dell'Uomo di Neanderthal (in alto); il cranio (in basso a sinistra); documentazione delle operazioni di rilievo e studio del reperto antropologico nel contesto di rinvenimento (in basso al centro); ingrandimenti progressivi dell'interno della cavità orbitaria destra del cranio (in basso a destra), utili



cui la conservazione dei resti impone restrizioni severe all'accesso e alla manipolazione. È in questo scenario che si colloca la Grotta di Lamalunga, situata nel cuore carsico dell'Alta Murgia barese, in Puglia (fig. 1). Scoperta nel 1993, la grotta custodisce l'Uomo di Altamura, l'individuo neanderthaliano più arcaico e completo finora noto a livello globale, i cui resti sono rimasti incastonati in un complesso sistema di gallerie e pozzi (fig. 2). La rilevanza del sito non risiede esclusivamente nel reperto osseo in sé, ma nella straordinaria convergenza di fenomeni geologici e processi tafonomici che hanno sigillato il corpo in una formazione calcitica per oltre centocinquantamila anni (Agostini 2010; Giacobini, Tagliacozzo, Manzi 2010; Branca, Voltaggio 2010).

Lamalunga non è solo un sito di rinvenimento; è un nodo di relazioni tra la superficie e il mondo sotterraneo, tra eventi naturali e azioni antropiche, tra il visibile e l'invisibile. L'inaccessibilità fisica del contesto, condizione necessaria alla sua tutela assoluta e alla conservazione di un microclima estremamente delicato, costituisce il punto di partenza di

un processo conoscitivo fondato sulla mediazione. Qui, la Scienza della rappresentazione assume un ruolo centrale come dispositivo critico, capace di costruire ponti tra la rigidità della pietra e la fluidità del dato digitale, consentendo di interrogare il tempo profondo attraverso modelli che superano la mera documentazione visiva e diventano strumenti di analisi spaziale e predittiva. Il contributo di questo studio consiste nell'integrare dati geofisici, modellazione digitale e ambienti immersivi in un unico *framework* interpretativo, capace di trasformare l'invisibile in uno scenario spaziale interrogabile.

Le rappresentazioni della Grotta di Lamalunga, pur condizionate dall'inaccessibilità del sito, si inseriscono in una più ampia tradizione di documentazione delle cavità carsiche mediterranee. Questa tradizione ha conosciuto nel tempo un'evoluzione significativa, passando dai rilievi manuali ai sistemi digitali più avanzati, con ricadute rilevanti sulla comprensione morfologica degli ambienti ipogei.

In questo contesto, è essenziale sottolineare come la rappresentazione non si limiti a una funzione descrittiva, ma assuma il ruolo di un vero e proprio *medium* capace di dare forma al sapere e di mettere in relazione le diverse discipline coinvolte. Attraverso una pratica interpretativa, essa rende possibile l'emersione di connessioni tra dati e spazi che non risultano immediatamente leggibili nel dato grezzo, contribuendo così a una comprensione più articolata e consapevole del contesto analizzato.

2. Lo stato dell'arte e la transizione verso il gemello digitale interpretativo

Il presente contributo, pur collocandosi in continuità con studi precedenti (Banfi, Dellù, Stanga et al. 2023; Banfi, Dellù, Cacudi et al. 2025), si distingue per l'approccio critico all'integrazione dei dati e per l'enfasi sulla costruzione di scenari interpretativi dinamici. Le ricerche condotte sulla Grotta di Lamalunga nell'ultimo quinquennio hanno progressivamente costruito un quadro metodologico innovativo, fondato sull'integrazione sistematica tra il rilievo digitale e la modellazione tridimensionale avanzata. Questo percorso non si è limitato all'uso di strumenti d'avanguardia,

years has progressively developed an innovative methodological framework that integrates digital surveying and advanced three-dimensional modelling. This process has not been limited to the use of cutting-edge tools but has fostered a deeper theoretical reflection on the role of surveying (Massari 1998) and representation in the construction of archaeological and paleoanthropological knowledge in highly fragile contexts.

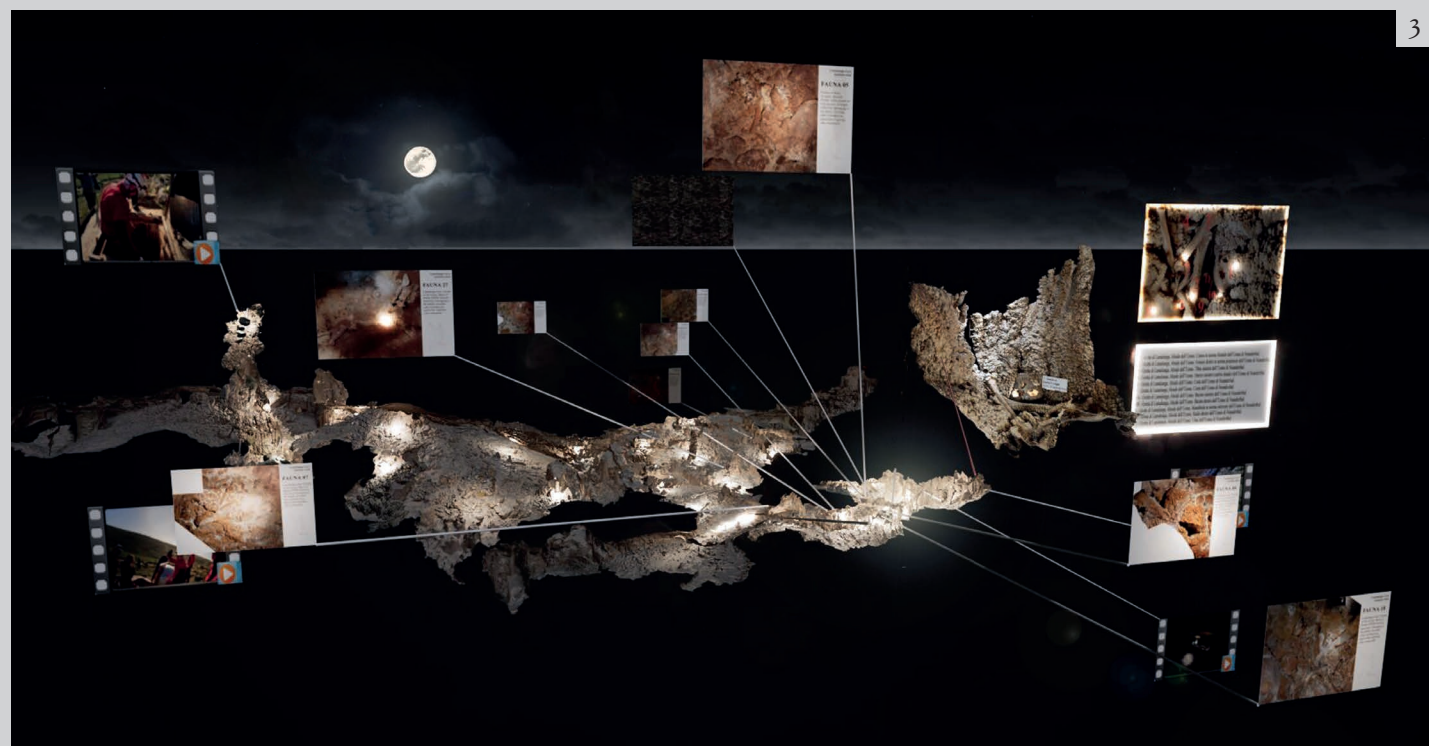
An initial phase defined an operational workflow to ensure metric accuracy and interoperability across scientific domains. Within this framework, the concept of digital twin has been reinterpreted as an operational and cognitive space in which high-resolution digitization and geometric modelling contribute to the creation of a multiscale knowledge infrastructure. From this perspective, attention shifts from the purely technical dimension of surveying to its intrinsic relationship with representation, understood not as a subsequent phase but as an integrated and co-generative moment within the knowledge process. Through advanced techniques, surveying and representation jointly contribute to the construction of articulated and com-

plex spatial knowledge, in which data acquisition and interpretative restitution mutually reinforce one another.

A second phase of investigation shifted the focus from the general context to faunal remains and, above all, to the paleoanthropological find as a core element of methodological experimentation. The digital reconstruction of the Altamura Man's skull, achieved through complex virtual stratigraphic removal of calcitic encrustations, has demonstrated that representation can serve as a powerful non-invasive analytical tool, capable of revealing morphological details inaccessible to direct observation. In this framework, virtual reality has not been conceived merely as a visual support for dissemination, but rather as a rigorous working environment in which anthropologists, archaeologists, biologists, and geologists can directly operate on the data – sectioning it and comparing it with other specimens from the Neanderthal evolutionary lineage through international comparative models. The digital model is not simply a representation of data, but the space in which data takes shape, is interrogated, and continuous-

Figure 2
Neanderthal remains (top); the skull (bottom left); documentation of survey and study activities of the anthropological find in its discovery context (bottom centre); progressive close-ups of the inner right orbital cavity of the skull (bottom right), useful for observing anatomical details and possible traces related to taphonomic processes or subsequent natural and anthropogenic interventions. Photographs and graphic processing by Fabrizio Banfi.

Figure 3
Digital Twin of the Lamalunga Cave: the 3D digital model integrates survey data, scientific analyses, and recent research, connecting faunal remains, paleoanthropological finds, and multimedia content within a dynamic archive for the study, conservation, and enhancement of a fragile and inaccessible context.



per l'osservazione di dettagli anatomici e di eventuali tracce riconducibili a processi tafonomici o a interventi naturali e antropici successivi alla deposizione. Fotografie ed elaborazione grafica a cura di Fabrizio Banfi.

Figura 3
Digital twin della Grotta di Lamalunga: il modello digitale 3D integra dati di rilievo, analisi scientifiche e ricerche recenti, connettendo resti faunistici, reperti paleoantropologici e contenuti multimediali in un archivio dinamico per lo studio, la conservazione e la valorizzazione di un contesto fragile e inaccessibile.

ma ha promosso una riflessione teorica profonda sul ruolo del rilievo (Massari 1998) e della rappresentazione nella costruzione della conoscenza archeologica e paleoantropologica in contesti ad elevata fragilità.

Una prima fase del processo ha definito una filiera operativa in grado di garantire l'accuratezza metrica e l'interoperabilità tra diversi ambiti scientifici. Il concetto di *digital twin* è stato qui riformulato come spazio operativo e cognitivo, in cui la digitalizzazione ad alta risoluzione e la modellazione geometrica mirano a costruire un'infrastruttura conoscitiva multiscalar. In questa prospettiva, l'attenzione si sposta dalla dimensione esclusivamente tecnico-operativa del rilievo alla sua intrinseca relazione con la rappresentazione, intesa non come fase successiva, ma come momento integrato e co-generativo del processo conoscitivo. Attraverso tecniche avanzate, rilievo e rappresentazione concorrono infatti alla costruzione di una conoscenza spaziale articolata e complessa, in cui l'acquisizione dei dati e la loro restituzione interpretativa si alimentano reciprocamente.

Un secondo momento di approfondimento ha spostato il focus dal contesto generale ai resti faunistici e, soprattutto, al reperto paleoantropologico inteso come fulcro di sperimentazione metodologica. La ricostruzione digitale del cranio dell'Uomo di Altamura, ottenuta mediante complessi processi di rimozione stratigrafica virtuale delle concrezioni calcitiche, ha dimostrato che la rappresentazione può essere uno strumento analitico non invasivo di straordinaria potenza, capace di rivelare dettagli morfologici preclusi all'osservazione diretta. In questo quadro, la realtà virtuale non è stata intesa come un semplice supporto visivo per la divulgazione, bensì come uno spazio di lavoro rigoroso in cui antropologi, archeologi, biologi e geologi possono operare direttamente sul dato, sezionandolo e confrontandolo con altri reperti della linea evolutiva neanderthaliana mediante l'uso di modelli comparativi internazionali. Il modello digitale non è una rappresentazione del dato, ma il luogo in cui il dato prende forma, viene interrogato e continuamente ridefinito. La rappresentazione non è dunque la fase conclusiva del processo di ricerca, bensì un atto epistemico in cui il dato

scientifico viene tradotto e reso comunicabile senza sacrificarne la complessità intrinseca.

L'esperienza di Lamalunga si inserisce così nel solco di strategie internazionali per la conservazione di contesti inaccessibili, dialogando idealmente con casi celebri come la Grotta di Altamura (con la realizzazione della Neocueva), Lascaux IV, Chauvet-Pont-d'Arc e la Grotta di Cosquer, dove la mediazione tra tutela e accesso avviene attraverso dispositivi rappresentativi capaci di restituire l'esperienza del luogo senza comprometterne l'integrità fisica (González Morales, Straus 2009; Champion 2021).

In questa prospettiva, il caso di Lamalunga non rappresenta un'eccezione isolata, ma si colloca coerentemente all'interno di un più ampio panorama internazionale (Di Vincenzo, Lari, Borsato et al. 2017; Cacudi, Dellù, Banfi et al. 2024), in cui la mediazione digitale assume un ruolo sempre più centrale non solo nella fruizione, ma soprattutto nella costruzione della conoscenza. In tali contesti, il digitale non si limita a restituire il dato, ma diventa un dispositivo attivo per l'elaborazione e la verifica di ipotesi morfologiche e spaziali, rafforzando il dialogo tra osservazione, interpretazione e modellazione. Il contributo di Di Vincenzo, Lari, Borsato et al., in particolare, evidenzia come l'integrazione tra analisi morfologiche, storiche, cronologiche e paleogenetiche consenta di ridefinire il valore dell'Uomo di Altamura nel quadro evolutivo dei Neanderthal europei, sottolineando al contempo l'importanza del contesto deposizionale della grotta. In continuità con tali approcci, e alla luce delle ricerche più recenti, il gemello digitale di Lamalunga si configura non come una rappresentazione statica, ma come un sistema dinamico e incrementale: un'infrastruttura conoscitiva in costante aggiornamento, capace di integrare *layer* informativi eterogenei – dalla *texture* fotorealistica delle pareti alle mappe di riflettanza, dai modelli di elevazione ad alta risoluzione alle ortofoto georeferenziate, dalle analisi microclimatiche ai dati petrografici e geochimici, fino ai dati geofisici di superficie – e di accogliere contributi multidisciplinari (fig. 3).

In questo modo, il gemello digitale diventa lo spazio in cui rilievo e rappresentazione trova-

ly redefined. Representation is therefore not the final stage of the research process, but an epistemic act in which scientific data is translated and made communicable without sacrificing its intrinsic complexity.

The Lamalunga experience thus aligns with international strategies for the conservation of inaccessible contexts, engaging in dialogue with well-known cases such as Altamira (with the Neocueva), Lascaux IV, Chauvet-Pont-d'Arc, and the Cosquer Cave, where the balance between preservation and access is achieved through representational devices capable of conveying the experience of the site without compromising its physical integrity (González Morales, Straus 2009; Champion 2021).

In this perspective, the Lamalunga case does not represent an isolated exception but fits coherently within a broader international framework (Di Vincenzo, Lari, Borsato et al. 2017; Cacudi, Dellù, Banfi et al. 2024), in which digital mediation plays an increasingly central role not only in dissemination but, above all, in knowledge production. In such contexts, digital tools do not merely reproduce data; they become active devices for developing and testing morphological and spatial hypotheses, strengthening the dialogue between observation, interpretation, and modelling. In particular, the contribution by Di Vincenzo, Lari, Borsato et al. highlights how integrating morphological, historical, chronological, and paleogenetic analyses allows for a redefinition of the Altamura Man's significance within the evolutionary framework of European Neanderthals, while also emphasizing the importance of the cave's depositional context. In continuity with these approaches, and in light of the most recent research, the Lamalunga digital twin should be understood not as a static representation, but as a dynamic and incremental system: a constantly evolving knowledge infrastructure capable of integrating heterogeneous information layers – from photorealistic textures of the cave walls to reflectance maps, from high-resolution elevation models to georeferenced orthophotos, from microclimatic analyses to petrographic and geochemical data, and up to surface geo-

physical data – while incorporating multidisciplinary contributions (fig. 3).

In this way, the digital twin becomes the space where surveying and representation achieve a full operational and epistemic synthesis, progressively expanding knowledge and awareness of a site of a unique kind. Within this theoretical and methodological framework, geophysical investigations are a crucial step, as they extend knowledge beyond the visible and enable testing of hypotheses developed through digital modelling.

3. From Invisible Data to Spatial Scenarios: Georadar and Interpretative Representation

To deepen understanding of the Lamalunga karst system and its potential unknown extensions, a complex campaign of non-invasive geophysical investigations was carried out to characterize the subsurface and carbonate bedrock. The methodological approach involved the complementary use of different techniques – magnetometry, ground-penetrating radar (GPR), and electrical resistivity tomography (ERT) – each sensitive to distinct physical properties of the ground.

The geophysical methods employed included:
- magnetometric surveys using a Gem System Overhauser magnetometer, aimed at detecting subsurface anomalies related to variations in magnetic susceptibility within the shallow subsurface;

- georadar surveys conducted with a GSSI SIR 4000 system equipped with a dual-frequency antenna centred at 200 MHz, capable of providing information on variations in the electromagnetic properties of the investigated medium down to depths of approximately 10 meters;

- electrical tomography using an IRIS Syscal Pro 10-channel resistivity meter, which enabled the generation of vertical profiles representing the main electrical discontinuities of the subsurface in the northern sector of the site.

The operational workflow included: geophysical data acquisition, signal processing and filtering, georeferencing, integration into the digital model, and spatial interpretation of anomalies. The integration of these methodologies made it possible to outline an interpretative framework for the site's internal structure

no una piena sintesi operativa ed epistemica, contribuendo ad ampliare progressivamente la conoscenza e la consapevolezza di un sito unico nel suo genere. In questo quadro teorico-metodologico, le indagini geofisiche rappresentano un passaggio cruciale, poiché consentono di estendere la conoscenza oltre il visibile e di mettere alla prova le ipotesi elaborate mediante la modellazione digitale.

3. Dal dato invisibile allo scenario spaziale: georadar e rappresentazione interpretativa

Per approfondire la conoscenza del sistema carsico di Lamalunga e delle sue possibili estensioni ignote, è stata condotta una complessa campagna di indagini geofisiche non invasive mirata alla caratterizzazione del sottosuolo e del *bedrock* carbonatico. L'approccio metodologico ha previsto l'impiego complementare di tecniche differenziate, quali la magnetometria, il georadar (GPR) e la tomografia elettrica (ERT), ciascuna sensibile a diverse proprietà fisiche del terreno.

Le metodologie geofisiche impiegate sono state le seguenti:

- indagini magnetometriche per mezzo di un magnetometro Gem System Overhauser finalizzate alla rilevazione di anomalie nel sottosuolo connesse a variazioni della suscettività magnetica nel primo sottosuolo;

- indagini georadar, realizzate con sistema GSSI SIR 4000 dotato di antenna a doppia frequenza centrale pari a 200 MHz in grado di fornire indicazioni sulla variazione delle caratteristiche elettromagnetiche del mezzo indagato fino a una profondità di circa 10 metri;

- tomografia elettrica mediante georesistivimetro IRIS Syscal Pro 10ch, che ha consentito l'elaborazione di profili verticali rappresentativi delle principali discontinuità elettriche del sottosuolo nella porzione settentrionale del sito.

Il workflow operativo ha previsto: l'acquisizione dei dati geofisici, l'elaborazione e filtraggio dei segnali, la georeferenziazione, l'integrazione nel modello digitale, l'interpretazione spaziale delle anomalie. L'integrazione di tali metodologie ha consentito di delineare un quadro interpretativo della struttura interna del sito e delle sue potenziali relazioni con l'esterno, fondato sull'analisi delle variazioni

elettromagnetiche e sulla suscettività magnetica del terreno circostante la grotta. Le attività sono iniziate con l'acquisizione di profili georadar volti a individuare volumi a bassa permittività riconducibili a vuoti, fratture sepolte o condotti carsici occlusi da sedimenti. Il rilievo magnetico ha permesso di identificare anomalie associate a eterogeneità litologiche e a possibili depositi, mentre la tomografia elettrica ha definito con estrema precisione i rapporti stratigrafici tra le unità superficiali e il substrato roccioso compatto.

Queste indagini si sono concentrate strategicamente nel settore di raccordo tra il versante collinare e la vallecchia prossima alla grotta, un'area che comprende volumi ipogei cruciali come l'Antro del Lupo e l'Abside dell'*Homo neanderthalensis*. In questo settore specifico, l'importanza dei rilievi geofisici risiede nella capacità di indagare la massa rocciosa ben oltre la superficie visibile, fino a profondità a cui né l'occhio umano né le sonde tradizionali possono accedere senza interventi distruttivi.

Il valore scientifico di tali dati è ampliato dal loro inserimento nel modello digitale tridimensionale della grotta, che funge da infrastruttura metrica globale. La sovrapposizione millimetrica tra la nuvola di punti del laser scanner, il modello digitale e i radargrammi consente infatti di verificare la coerenza spaziale tra le cavità note e le strutture sepolte individuate dai segnali elettromagnetici. Al di là della descrizione strumentale, il dato geofisico viene qui tradotto in configurazioni spaziali, in cui vuoti, fratture e discontinuità diventano elementi di una possibile architettura ipogea. Questa trasformazione consente di superare una lettura puramente analitica e di introdurre una dimensione interpretativa basata sulla costruzione di scenari (fig. 4).

In particolare, l'integrazione, interpretazione e modellazione dei dati hanno evidenziato, nell'area di fondovalle, una possibile paleosuperficie la cui quota altimetrica risulterebbe compatibile con i piani di calpestio del Pleistocene medio, suggerendo con forza la collocazione di un antico punto di passaggio, oggi obliterato, tra l'ambiente esterno e il cuore del sistema carsico. L'interpretazione dei dati geofisici consente di avanzare l'ipotesi che uno

and its potential connections to the exterior, based on analyses of electromagnetic variations and the magnetic susceptibility of the surrounding terrain. The investigation began with the acquisition of GPR profiles to identify low-permittivity volumes associated with voids, buried fractures, or karst conduits occluded by sediments. Magnetometric surveys identified anomalies associated with lithological heterogeneities and potential deposits, while electrical tomography precisely delineated the stratigraphic relationships between superficial units and the underlying bedrock. These investigations were strategically concentrated in the transitional sector between the hillside slope and the small valley near the cave – an area that includes key hypogeal volumes such as the Antro del Lupo and the apse of the *Homo neanderthalensis*. In this specific sector, the importance of geophysical surveys lies in their ability to investigate the rock mass far beyond the visible surface, reaching depths inaccessible to direct observation or traditional probes without destructive intervention.

The scientific value of these data is further enhanced by their integration into the three-dimensional digital model of the cave, which functions as a global metric infrastructure. The millimetric alignment between the laser scanner point cloud, the digital model, and the radargrams enables verification of the spatial coherence between known cavities and the buried structures identified through electromagnetic signals. Beyond instrumental description, geophysical data are here translated into spatial configurations in which voids, fractures, and discontinuities become elements of a potential hypogeal architecture. This transformation makes it possible to move beyond purely analytical reading and introduce an interpretative dimension based on scenario construction (fig. 4).

In particular, the integration, interpretation, and modelling of the data have highlighted, in the valley-floor area, a possible paleosurface whose elevation appears consistent with Middle Pleistocene walking levels, strongly suggesting the location of an ancient passage point – now obliterated – between the external environment and the core of the karst system.

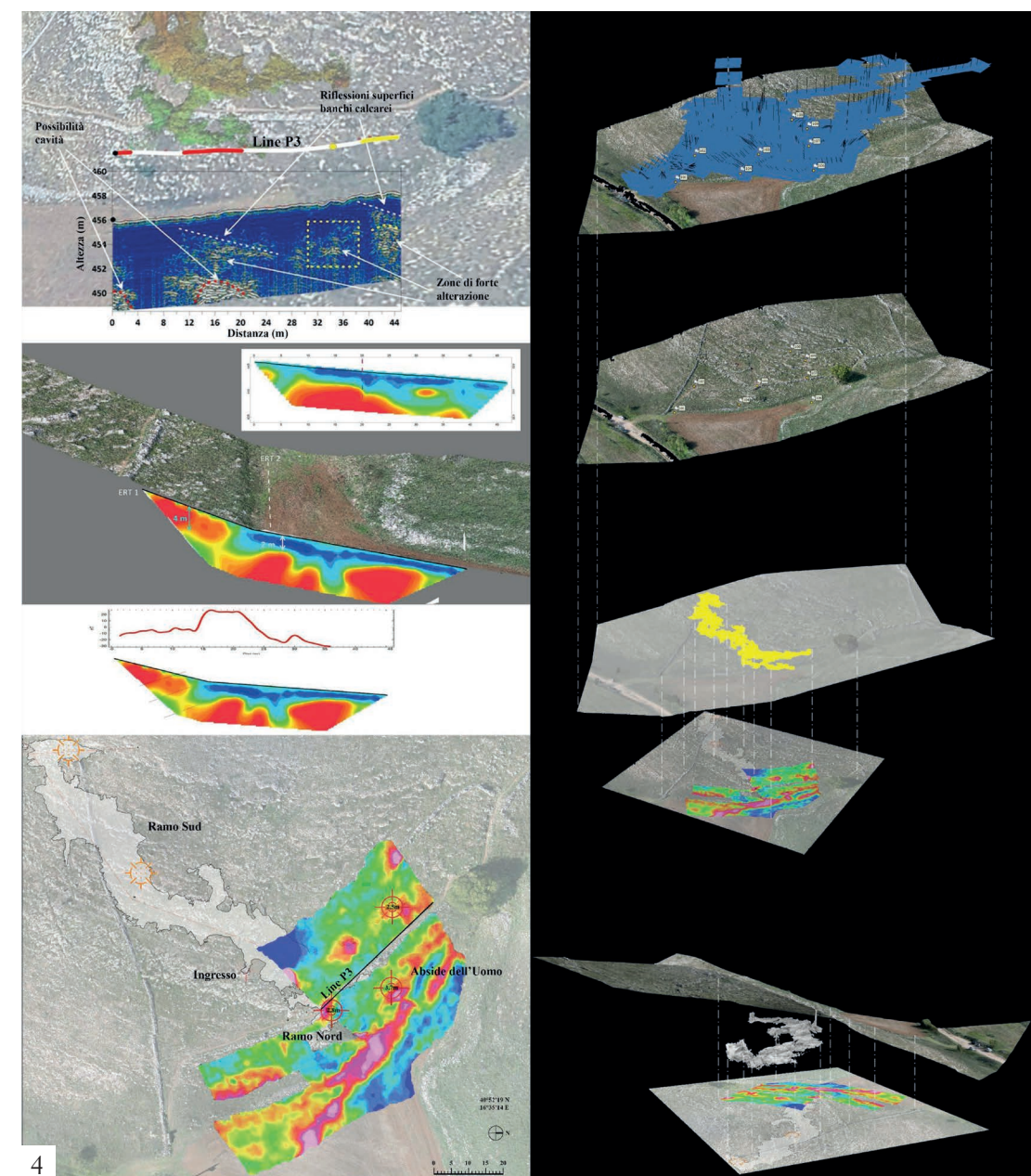
The interpretation of the geophysical data supports the hypothesis that one of the former access points to the cave was affected by gravitational collapse phenomena or significant internal landslides, leading to the occlusion of originally interconnected passages. Within this research framework, digital modelling transforms the search for access into a process of dynamic spatial simulation, in which archaeological hypotheses find quantitative support in the physical properties of the subsurface.

However, it is essential to emphasize, with strict methodological rigor, that the results obtained at this stage remain hypothetical. The reliability and validity of the geophysical data must necessarily be tested through targeted archaeological investigations and direct stratigraphic verification in the field in the near future. Only the objective evidence from excavation tests will ultimately confirm the nature of the identified deposits and determine whether the detected anomalies are anthropogenic or natural access points.

In this sense, the digital model – far from providing closed or definitive answers – makes the invisible finally interrogable. It transforms discrete geophysical data into a coherent, structured, and verifiable spatial scenario. Acting as an advanced interpretative device, it integrates heterogeneous information – physical, geometric, and stratigraphic – within a single metric and topological reference system. Within this framework, georadar and geoelectrical anomalies are no longer read as isolated signals, but as structured volumes dynamically related to known cavities, discontinuity surfaces, and the external morphological setting. The model thus becomes a predictive tool, capable of guiding future archaeological and stratigraphic investigations in a targeted manner, reducing interpretative uncertainty and minimizing invasive interventions. From this perspective, the digital model does not replace excavation data but rather anticipates and guides investigative strategies, positioning itself as a key element in long-term research planning and in an integrated, scientifically grounded understanding of the evolution of the Lamalunga karst system.

Figure 4
GPR radargrams on carbonate surface showing anomalies interpretable as discontinuities, alterations, and possible cavities (top left); GPR depth sections and maps integrated with ERT, illustrating the relationship between sediment cover and bedrock (centre); correlation between magnetometric data, geophysical anomalies, and the georeferenced 3D model of the cave (right). Photographs and graphic processing by Fabrizio Banfi and Elena Dellù.

Figura 4
Radargrammi GPR su superficie carbonatica con anomalie interpretabili come discontinuità, alterazioni e possibili cavità (in alto a sinistra); sezioni e mappe di profondità GPR integrate con ERT, che mostrano il rapporto tra la copertura sedimentaria e il substrato (centro); correlazione tra dati magnetometrici, anomalie geofisiche e modello 3D georeferenziato della grotta (destra). Fotografie ed elaborazione grafica a cura di Fabrizio Banfi ed Elena Dellù.



4

degli accessi storici alla cavità sia stato interessato da fenomeni di collasso gravitativo o da imponenti smottamenti interni, che avrebbero determinato l'occlusione dei varchi originariamente comunicanti tra loro. In questa prospettiva di ricerca, la modellazione digitale trasforma la ricerca dell'accesso in un processo di simulazione spaziale dinamica, in cui l'ipotesi archeologica trova riscontro quantitativo nella fisica del suolo.

È tuttavia indispensabile sottolineare, con estremo rigore metodologico, che i risultati

ottenuti in questa fase costituiscono una base ipotetica. La correttezza e l'attendibilità dei dati geofisici dovranno necessariamente essere sottoposte ad analisi archeologiche mirate e a verifiche stratigrafiche dirette sul campo in un prossimo futuro. Solo il riscontro oggettivo del saggio di scavo potrà confermare definitivamente la natura dei depositi identificati e stabilire se le anomalie rilevate corrispondono effettivamente a varchi di accesso antropici o naturali.

Il modello digitale, in questo senso, lungi dal

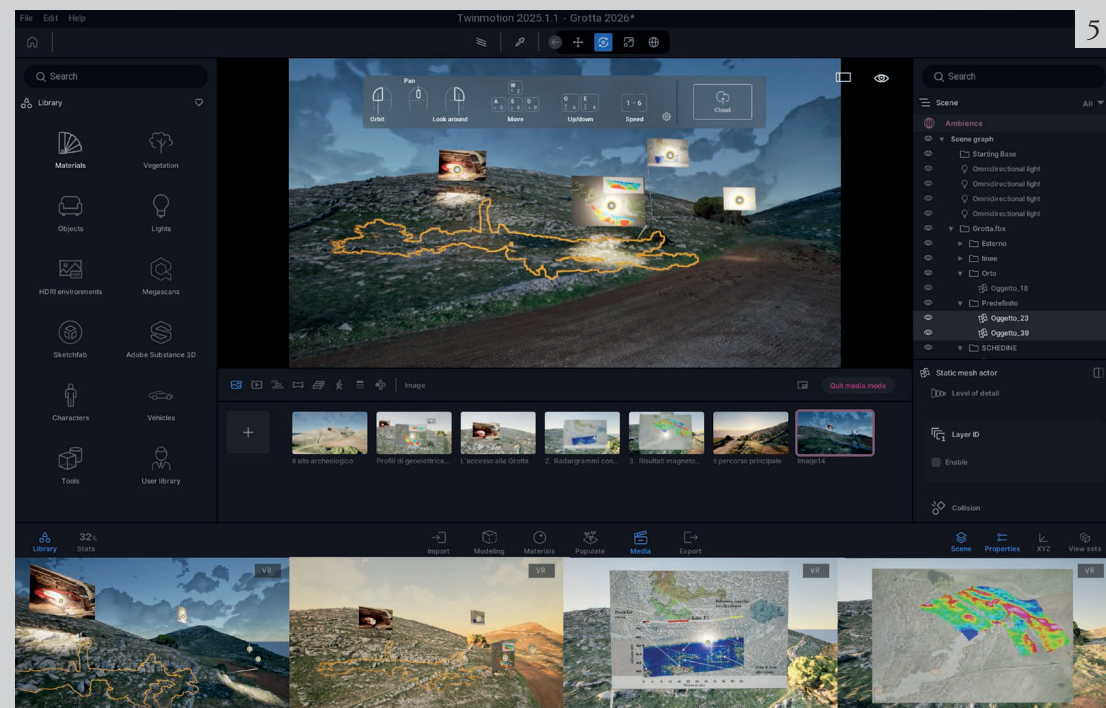


Figure 5
Thanks to recent developments and GPR surveys conducted between October and November 2025, the immersive environment in Twinmotion has been enriched with results obtained outside the cave. The digital model enables the integration of internal and external data, offering a more comprehensive understanding of the cave's evolution and the relationships that have developed over time.

4. Virtual Ecosystems and Knowledge Construction: VR as a Cognitive Environment

Contemporary representation of cultural heritage moves beyond its traditional illustrative role to become a total cognitive environment: a logical and sensory space in which scientific data is not merely statically visualized, but actively related and transformed into a deep knowledge experience. The integration of high-resolution digital models, georadar survey data, and virtual reality environments has shown that understanding complex and physically inaccessible contexts such as Lamalunga requires a representational system capable of simultaneously accommodating metric, spatial, perceptual, and narrative dimensions. The virtual environment should not be considered a simple transposition of reality, but rather an intentional and critical construction in which spatiality becomes the primary vector for understanding archaeological phenomena. In this digital space, information is stratified to enable critical reading that goes far beyond surface-level visual observation, allowing navigation across different scales of detail and data types. Within these immersive environments, spatiality is calibrated and interpreted through advanced XR development engines that man-

age lighting, shadows, and physical perception with a high degree of realism, restoring sensations of gravity and bodily presence. Choices related to scale and to the complex relationship between solids and voids directly influence how the context is developed and understood by the observer.

In the specific case of Lamalunga, virtual exploration enables the reconstruction of an overall perception of karst morphology that no physical experience could currently provide, due to the extremely narrow passages and the strict conservation constraints that prevent human access. The construction of the virtual environment goes beyond geometric reproduction, also reconstructing relationships among spaces, movement sequences, and perceptual conditions. VR also enables the simulation of traversal time, introducing a narrative dimension absent from static models. The developed system thus becomes a necessary, rather than optional, condition for the site's cognitive accessibility. Within this methodological framework, virtual proxemics plays a key role, understood as the scientific analysis of the relationships between the observer's body, the surrounding space, and the psychological perception of the cave's physical limits.

Figura 5
Grazie agli ultimi sviluppi e alle indagini georadar condotte tra ottobre e novembre 2025, l'ambiente immersivo in Twinmotion è stato arricchito dai risultati ottenuti all'esterno della grotta. Il modello digitale consente di correlare i dati interni ed esterni alla grotta, offrendo una percezione più completa delle evoluzioni e delle relazioni instauratesi nel corso del tempo.

fornire risposte chiuse o definitive, rende finalmente interrogabile l'invisibile. Trasforma il dato geofisico puntuale in uno scenario spaziale coerente, strutturato e verificabile. Esso agisce come dispositivo interpretativo avanzato, capace di integrare informazioni eterogenee – fisiche, geometriche e stratigrafiche – in un unico sistema di riferimento metrico e topologico. In tale cornice, le anomalie georadar e geoelettriche non vengono più lette come semplici segnali isolati, bensì come volumi strutturati, dinamicamente correlati alle cavità note, alle superfici di discontinuità e all'assetto morfologico esterno. Il modello diventa così uno strumento predittivo, in grado di orientare in modo mirato le future verifiche archeologiche e stratigrafiche, riducendo l'incertezza interpretativa e limitando al minimo gli interventi invasivi. In questa prospettiva, il modello digitale non sostituisce il dato di scavo, ma ne anticipa e ne guida la strategia, ponendosi come elemento cardine per la pianificazione delle indagini a lungo termine e per una lettura integrata e scientificamente fondata dell'evoluzione del sistema carsico di Lamalunga.

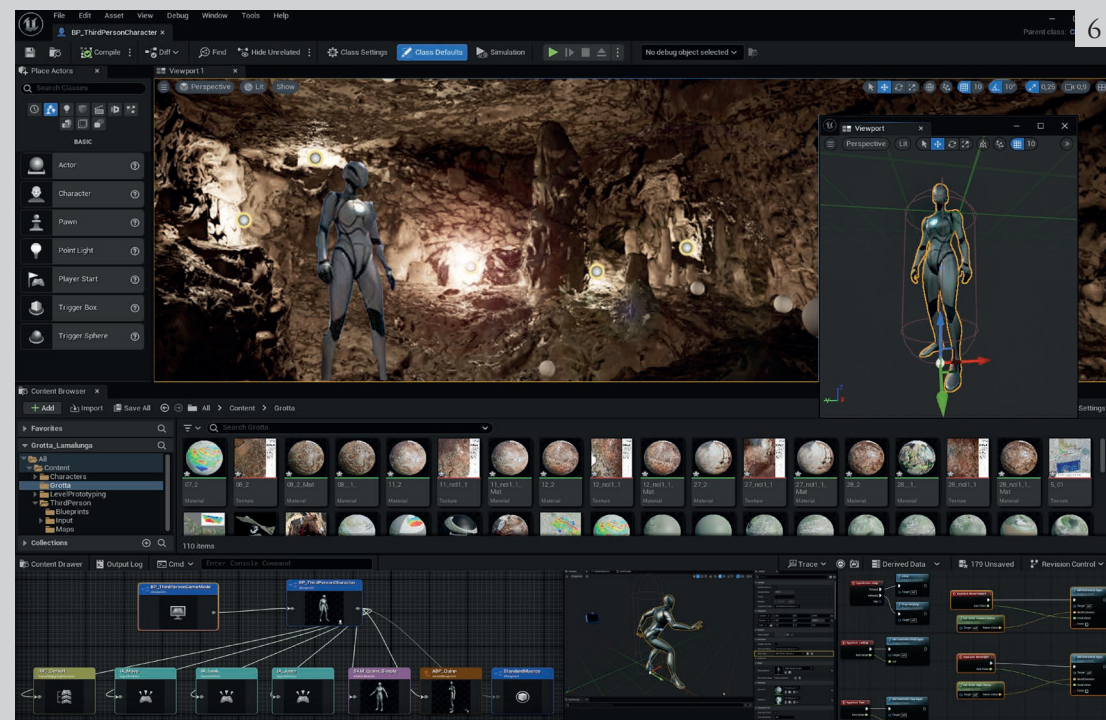
4. Ecosistemi virtuali e costruzione della conoscenza: l'ambiente VR come spazio cognitivo

La rappresentazione contemporanea del patrimonio culturale supera il tradizionale ruolo illustrativo per configurarsi come un ambiente cognitivo totale: uno spazio logico e sensoriale in cui il dato scientifico non è solo visualizzato staticamente, ma messo in relazione attiva e trasformato in un'esperienza di conoscenza profonda. L'integrazione tra i modelli digitali ad alta risoluzione, i dati derivanti dalle prospezioni georadar e gli ambienti di realtà virtuale ha evidenziato che la conoscenza di contesti complessi e fisicamente inaccessibili come Lamalunga richiede un sistema di rappresentazione capace di accogliere simultaneamente dimensioni metriche, spaziali, percettive e narrative. L'ambiente virtuale non deve essere considerato una semplice trasposizione del reale, bensì una costruzione intenzionale e critica, in cui la spazialità diventa il principale vettore di comprensione dei fenomeni archeologici. In questo spazio digitale, l'informazione viene stratificata per consentire una lettura cri-

tica che va ben oltre la semplice osservazione visiva di superficie, permettendo di navigare tra diverse scale di dettaglio e tipologie di dati. All'interno di questi ambienti immersivi, la spazialità è calibrata e interpretata attraverso l'uso di motori di sviluppo XR avanzati che gestiscono l'illuminazione, le ombre portate e la percezione fisica in modo estremamente realistico, restituendo la sensazione di gravità e di ingombro corporeo. Le scelte relative alla scala di rappresentazione e alla complessa relazione tra pieni e vuoti incidono direttamente sulla modalità in cui il contesto viene sviluppato e compreso dall'osservatore.

Nel caso specifico di Lamalunga, l'esplorazione virtuale consente di ricostruire una percezione d'insieme della morfologia carsica che nessuna esperienza fisica potrebbe oggi restituire, a causa della ristrettezza estrema dei condotti e dei severissimi vincoli di tutela che impediscono il transito umano. La costruzione dell'ambiente virtuale non si limita alla riproduzione geometrica, ma ricostruisce anche le relazioni tra gli ambienti, le sequenze di attraversamento e le condizioni percettive. La VR consente inoltre di simulare il tempo di percorrenza, introducendo una dimensione narrativa assente nei modelli statici. Lo sviluppo condotto diventa così una condizione necessaria e non opzionale per l'accessibilità cognitiva del sito. In questo quadro metodologico si colloca la prossemica virtuale, intesa come l'analisi scientifica delle relazioni tra il corpo dell'osservatore, lo spazio circostante e la percezione psicologica dei limiti fisici della grotta. Gli ambienti di realtà estesa permettono di sperimentare virtualmente altezze, pendenze scoscese e strette aperture, rendendo percepibili le strutture organizzative dello spazio che, altrimenti, resterebbero dati astratti su una planimetria bidimensionale. In questo processo di traduzione visiva, il dato geofisico acquisito in superficie viene iscritto nello spazio virtuale della grotta come informazione spazializzata e multimediale, consentendo all'utente di vedere idealmente, attraverso le pareti rocciose, le anomalie individuate dai sensori, le analisi condotte e la documentazione principale prodotta (fig. 5).

Le anomalie e i vuoti ipotizzati diventano



Extended reality environments allow users to virtually experience heights, steep slopes, and narrow openings, making spatial structures perceptible that would otherwise remain abstract data in a two-dimensional plan. In this process of visual translation, geophysical data acquired at the surface is embedded within the cave's virtual space as spatialized and multimedia information, enabling users to virtually 'see' through rock walls the anomalies detected by sensors, the analyses performed, and the primary documentation produced (fig. 5). Hypothesized anomalies and voids become explorable elements, directly comparable in real time with the cave walls surveyed through laser scanning and subsequently made tangible through the modeling process. Heterogeneous contents – including analyses, charts, interviews, video simulations, audio recordings, and photogrammetric models of faunal remains and the Altamura Man – have been integrated into XR development platforms (Twinmotion 2025.1.2 and Unreal Engine 5.3.2), becoming interactive multimedia objects that users can access, visualize, and experience as dynamic pop-ups. Different development logics were adopted to ensure appropriate interaction with each type

of content. Using the Twinmotion editor, it was possible to design a first-person immersive experience without a dedicated avatar. Moreover, by adopting a web-oriented development approach, the digital ecosystem was deployed in the cloud, making it accessible to a wide range of users and devices – from VR headsets to more inclusive, widely available tools such as tablets, laptops, and smartphones. For the latter, WebVR enabled the development of a dedicated application for navigating the entire digital ecosystem via touch interfaces, significantly broadening accessibility. In Unreal Engine, higher levels of immersion and interaction were achieved through specific development logic built with Blueprints – a visual scripting system that avoids direct C++ coding. This approach made it possible to assign physics, collision detection, and behaviours to the various objects and content, and to conduct a new phase of testing focused on exploring the cave and its environments through a third-person avatar (figs. 6, 7). According to the principles of E.T. Hall, distances between objects, contents, and the avatar were designed to reflect the four zones of interpersonal distance – intimate 0 - 45 cm, personal 45 cm - 1.2 m, social 1.2 - 3.6 m and

Figure 6
The level of immersion and interactivity was further enhanced through Unreal Engine's node-based programming system (Blueprints). Physics, collisions, and behaviours were assigned to the various imported objects. Thanks to the Third Person Template, it was also possible to interact both in first-person mode and through an avatar that could respond to the cave's geometric complexity and its contents.

Figure 7
The Neanderthal remains in the WebVR application developed in Twinmotion. The user, in first-person mode, can immerse directly in the Apse of the Man and interact with the remains and related information through mobile devices, touch interfaces, and VR headsets.

Figura 6
Il livello di immersione e di interattività è stato ampliato grazie al linguaggio di programmazione basato sui nodi (*Blueprint*) di Unreal Engine. Fisica, collisioni, comportamenti sono stati associati ai vari oggetti importati. Grazie al Third Person Template è stato inoltre possibile interagire sia in prima persona sia tramite un avatar, in grado di rispondere alle complessità geometriche della grotta e ai suoi contenuti.

Figura 7
I resti dell'Uomo di Neanderthal nell'app WebVR sviluppata in Twinmotion. L'utente, in prima persona, può immergersi direttamente nell'Abside dell'Uomo e interagire con i suoi resti e con le informazioni ad essi collegate tramite dispositivi mobili, touch e visore VR.

elementi esplorabili e confrontabili in tempo reale con le pareti effettivamente rilevate dal laser scanner e poi rese tangibili dal processo di modellazione. Contenuti eterogenei, analisi, grafici, interviste, simulazioni video, registrazioni audio, modelli fotogrammetrici dei resti faunistici e dell'Uomo di Altamura sono stati inseriti direttamente nelle piattaforme di sviluppo XR (Twinmotion 2025 1.1 e Unreal Engine 5.3.2), diventando così contenuti multimediali e oggetti virtuali interattivi, richiamabili, visualizzabili ed esperibili come veri e propri pop-up dall'utente. Per interagire in modo appropriato con ogni contenuto interattivo, sono state adottate diverse logiche di sviluppo. Grazie all'editor di Twinmotion è stato possibile orientare l'esperienza immersiva in prima persona, senza l'ausilio di un vero e proprio avatar. Grazie a una linea di sviluppo orientata al web, è stato trasferito l'ecosistema digitale in cloud raggiungendo così diverse tipologie di utenti e dispositivi, dal visore VR fino a dispositivi più di facile utilizzo e inclusivi, come tablet, laptop e cellulari. Per quest'ultimi, grazie alla webVR è stato possibile sviluppare una vera e propria app per navigare l'intero ecosistema digitale tramite *display touch*, garantendo un accesso più ampio. In Unreal Engine, invece, sono stati aumentati i livelli di immersione e di interazione tramite specifiche logiche di sviluppo basate sui *blueprints*, un linguaggio di

programmazione visiva che consente di evitare la scrittura diretta di *script* in C++. Grazie ad esso e alle conoscenze di logiche di sviluppo specifiche, oltre ad associare la fisica, le collisioni e i comportamenti ai vari oggetti e contenuti inseriti, è stato possibile condurre una nuova fase di test orientati a comprendere come, tramite un avatar in terza persona, la grotta e i suoi ambienti potessero essere esplorabili (figg. 6, 7).

In base ai principi di E.T. Hall, la distanza tra oggetti, contenuti e l'avatar stesso è stata progettata per rappresentare le quattro zone di distanza interpersonale e regolare la comunicazione non verbale in base al grado di intimità: intima da 0 a 45 cm, personale da 45 cm a 1,2 m, sociale da 1,2 a 3,6 m e pubblica oltre 3,6 m (Hall 1966). Il dato scientifico si è così trasformato in un ecosistema relazionale dinamico, in cui l'utente, in libertà, può esplorare la grotta, visionare i resti ossei, testare ipotesi volumetriche, simulare antichi percorsi di accesso e confrontare diverse configurazioni dello spazio antico prima che i processi geologici lo modifichino.

Questo approccio ha trasformato radicalmente il modello digitale, elevandolo da oggetto statico di documentazione a un ecosistema interdisciplinare per l'archiviazione della memoria e l'aggiornamento della nuova conoscenza, in cui la visualizzazione e l'interazione virtuale diventano lo strumento prin-



public over 3.6 m – thus regulating nonverbal communication according to degrees of proximity and interaction (Hall 1966). In this way, scientific data is transformed into a dynamic relational ecosystem in which users can freely explore the cave, observe skeletal remains, test volumetric hypotheses, simulate ancient access routes, and compare different spatial configurations prior to geological transformations. This approach has radically transformed the digital model, elevating it from a static documentation object to an interdisciplinary ecosystem for memory archiving and knowledge updating, in which visualization and virtual interaction serve as primary tools for validating complex spatial and evolutionary theories.

5. Memory as a Stratified Dimension: Geology, Perception, and the Resilient Image

The concept of memory, in the context of the Lamalunga Cave, unfolds across three main dimensions: material, digital, and sensory. It is not a static recording of the past, but a stratified process of preservation, interpretation, and continuous re-signification. Rather than being understood as a simple fixation of data or images, memory must be interpreted as a layered process of conservation, decoding, and ongoing reinterpretation of the past.

In this framework, memory first manifests itself in its powerful material dimension: the calcitic concretions enveloping the remains of the Altamura Man represent the mineral ink through which deep time has sealed the biological history of an individual who lived during the Middle Pleistocene. However, this memory – while invaluable – would remain inherently opaque and silent without a transdisciplinary approach, in which digitization and interpretative modelling play a central role. Through laser scanning and advanced photogrammetry, it is not merely the external form of the deposit that is replicated; rather, a physical memory archive is established, one that can be analytically interrogated countless times without compromising the integrity of the original.

The digital model thus becomes an immersive palimpsest, a logical and mathematical space in which the memory of collapses, ancient

floods, and sedimentary – as well as faunal – deposits can be progressively deciphered through segmentation algorithms and spatial analysis. In this perspective, digital representation acts as a form of scientific anamnesis, capable of bringing to light spatial and temporal connections that the dense materiality of rock would otherwise conceal. This interpretation of memory moves beyond a purely conservative view, introducing a dynamic dimension in which the past is continuously renegotiated through representation. Beyond its documentary and geological dimension, the component of sensory – or embodied memory – emerges with particular strength. When a researcher or visitor explores the cave in a rigorously designed extended-reality environment, deeply rooted physiological and cognitive responses are activated, linked to ancestral perceptions of space. The controlled reduction of light, the accurate reproduction of terrain slopes, and the psychological sensation of compression induced by virtual walls activate a bodily memory that resonates with the cave's spatiality. This form of sensory archaeology enables the reconstruction not only of the inventory of remains present at the site, but also of the very quality of the lived experience within that remote environment – recovering the memory of ancient gestures: bending to pass through narrow passages, moving with extreme caution on slippery and irregular surfaces, and losing spatial orientation in the absolute darkness of the underground.

Virtual reality thus restores the memory of the physical and psychological interaction between the Neanderthal individual and the karst environment, providing experiential and proxemic data that no isolated skeletal remains could ever convey to contemporary scholars.

This complex stratification of meanings ultimately leads to the definition of the concept of the resilient image, representing the final evolution of digital memory applied to human heritage. While human memory is inherently subject to inevitable forgetting and traditional physical media to material decay, the resilient image is designed to endure over time, adapt to emerging technological languages, and

cipale per la validazione di teorie spaziali ed evolutive complesse.

5. La memoria come dimensione stratificata: geologia, percezione e immagine resiliente

Il concetto di memoria, nel contesto della Grotta di Lamalunga, si articola in tre dimensioni principali: materiale, digitale e sensoriale. Non si tratta di una registrazione statica del passato, ma di un processo stratificato di conservazione, interpretazione e risignificazione continua. Essa non può essere intesa in modo semplicistico come la registrazione statica di un dato o di un'immagine, ma va interpretata come un processo stratificato di conservazione, decodifica e continua risignificazione del passato.

In questo scenario, la memoria si manifesta innanzitutto nella sua imponente componente materiale: le concrezioni calcitiche che avvolgono i resti dell'Uomo di Altamura rappresentano l'inchiostro minerale con cui il tempo profondo ha sigillato la storia biologica di un individuo vissuto nel Pleistocene medio. Questa memoria, per quanto preziosa, risulterebbe tuttavia intrinsecamente opaca e muta senza l'intervento di un approccio transdisciplinare, che vede, *in primis*, nella digitalizzazione e nella modellazione interpretativa i suoi elementi cardine. Attraverso il rilievo laser e la fotogrammetria avanzata, non si effettua una mera copia della forma esterna del deposito, ma si istituisce un archivio della memoria fisica che può essere interrogato analiticamente infinite volte senza compromettere l'integrità dell'originale.

Il modello digitale diventa così un palinsesto immersivo, uno spazio logico e matematico in cui la memoria dei crolli, delle antiche alluvioni e dei depositi sedimentari, nonché faunistici, può essere progressivamente decifrata attraverso algoritmi di segmentazione e di analisi spaziale. In questa prospettiva, la rappresentazione digitale agisce come una vera e propria anamnesi scientifica, capace di riportare alla luce connessioni spaziali e temporali che la roccia, nella sua densità millenaria, tenderebbe a celare per sempre. Questa lettura della memoria supera una visione conservativa, introducendo una dimensione dinamica in

cui il passato viene costantemente rinegoziato attraverso la rappresentazione. Oltre alla dimensione puramente documentale e geologica, emerge con straordinaria forza la componente della memoria sensoriale o incorporata, spesso definita nel dibattito scientifico come *embodied memory*. Quando un ricercatore o un visitatore esplora la grotta in un ambiente di realtà estesa progettato con rigore, si attivano risposte fisiologiche e cognitive profondamente legate alla percezione ancestrale dello spazio. La riduzione controllata della luce, la fedele riproduzione delle pendenze del terreno e la sensazione psicologica di compressione indotta dalle pareti virtuali attivano una memoria del corpo che risuona con la spazialità della grotta. Questa forma di archeologia dei sensi permette di ricostruire non solo l'elenco dei reperti presenti sul sito, ma anche la qualità stessa dell'esperienza vissuta in quel luogo remoto, recuperando la memoria del gesto antico: il chinarsi per attraversare un condotto angusto, il muoversi con estrema cautela su superfici scivolose e irregolari, il perdere i riferimenti cardinali nel buio assoluto della terra. La realtà virtuale recupera, dunque, la memoria dell'interazione fisica e psichica tra l'individuo neanderthaliano e l'ambiente carsico, fornendo dati esperienziali e prossemici che nessun reperto osseo isolato potrebbe mai restituire agli studiosi contemporanei.

Questa complessa stratificazione di significati conduce infine alla definizione del concetto di immagine resiliente, che rappresenta l'evoluzione finale della memoria digitale applicata al patrimonio dell'umanità. Mentre la memoria umana è per sua natura soggetta all'ineludibile oblio e i supporti fisici tradizionali sono destinati a un inevitabile degrado materico, l'immagine resiliente è progettata per durare nel tempo, adattarsi ai nuovi linguaggi tecnologici e trasformarsi senza mai perdere la propria matrice di fedeltà scientifica.

La memoria di Lamalunga, mediata dal suo sofisticato clone digitale, diventa un'entità interoperabile tra diverse piattaforme di modellazione digitale e di sviluppo XR, costantemente aggiornabile con le nuove scoperte derivanti dalle indagini archeologiche attuali e future, e intrinsecamente narrativa nel modo in cui co-

transform without ever losing its foundation of scientific reliability.

The memory of Lamalunga, mediated through its sophisticated digital twin, becomes an interoperable entity across different digital modelling and XR development platforms – constantly updatable with new discoveries from ongoing and future archaeological investigations, and inherently narrative in the way it communicates complexity to the outside world. This form of digital memory does not crystallize the past into a static, lifeless icon; rather, it preserves it as a living, dynamic organism capable of evolving alongside advances in human knowledge. Managing this memory responsibly, therefore, entails an ethical commitment: ensuring that the inaccessible remains a vibrant presence within contemporary culture – an inheritance that not only bears witness to the past but continues to raise critical questions for present-day technological frameworks and future scientific research. In this sense, immersive representation assumes responsibility for the persistence of deep time, transforming fragments of rock or skeletal remains into a universal narrative about the human condition and its evolution.

6. Scientific Narrative, Conservation, Public Access and the Ethical Responsibility of the Digital

The scientific narrative applied to the Lamalunga case converges toward a critical framework in which the narration and preservation of deep time are no longer entrusted solely to written text but are actively constructed through spatial experience and the conscious stratification of digital information. Immersive environments make it possible to address one of the most complex challenges of contemporary scientific communication: avoiding excessive simplification while ensuring accessibility for a broad, non-specialist audience. The complexity of the archaeological site is neither reduced nor trivialized, but articulated across multiple levels of exploration, enabling differentiated knowledge pathways – from an overall understanding of the karst system morphology to the microscopic analysis of geological discontinuities or georadar-detected anomalies. Digital access thus becomes an act of active exploration, in which each user can construct their own path of knowledge within a scientifically validated framework.

Within this theoretical perspective, narrative



Figure 8
The virtual labyrinth of the
Lamalunga Cave between
science, memory, and
immersive representation.

munica la complessità al mondo esterno.

Questa forma di memoria digitale non cristallizza il passato in un'icona immutabile e priva di vita, ma lo mantiene come un organismo vivo, dinamico e capace di evolversi con il progresso della conoscenza umana. Gestire responsabilmente questa memoria significa dunque assumersi il compito etico di garantire che l'inaccessibile rimanga una presenza vibrante nella cultura contemporanea, un'eredità che non si limita a testimoniare il passato ma continua a porre domande cruciali al presente tecnologico e alla ricerca scientifica di domani. In questo senso, la rappresentazione immersiva si fa carico della persistenza del tempo profondo, trasformando un frammento di roccia o dei resti ossei in una narrazione universale sulla condizione umana e sulla sua evoluzione.

6. Narrazione scientifica, conservazione, fruizione pubblica e responsabilità etica del digitale

La narrazione scientifica applicata al caso di Lamalunga converge in un orizzonte critico in cui il racconto e la conservazione del tempo profondo non sono più affidati alla sola parola scritta, ma si costruiscono attivamente attraverso l'esperienza spaziale e la stratificazione consapevole dell'informazione digitale. Gli ambienti immersivi consentono di affrontare uno dei nodi più complessi e delicati della comunicazione scientifica moderna: la necessità di evitare una semplificazione eccessiva dei contenuti, senza rinunciare all'accessibilità a un pubblico ampio e non specialistico. La complessità del sito archeologico non viene né ridotta né banalizzata, ma articolata in diversi livelli esplorabili, consentendo traiettorie conoscitive differenziate che spaziano dalla lettura d'insieme della morfologia del sistema carsico all'analisi microscopica delle discontinuità geologiche o delle anomalie rilevate dal georadar. La fruizione digitale diventa così un vero e proprio atto di esplorazione attiva, in cui ogni utente può costruire il proprio percorso di conoscenza all'interno di un perimetro scientificamente validato.

In questo quadro teorico, la narrazione assume una dimensione eminentemente spaziale e corporea. Il tempo profondo non viene evocato tramite immagini statiche o testi pura-

mente cronologici, ma è reso percepibile attraverso la relazione dinamica tra le distanze percorse e le soglie attraversate, restituendo all'osservatore la natura processuale delle imponenti trasformazioni ambientali avvenute nel corso di decine di migliaia di anni. La rappresentazione virtuale permette di visualizzare tali trasformazioni come dinamiche progressive, rendendo finalmente osservabile ciò che nel mondo reale risulterebbe troppo lento, frammentario o spazialmente inaccessibile per essere colto dalla percezione umana. Questa modalità di fruizione avanzata comporta, inevitabilmente, una responsabilità etica precisa e inderogabile da parte dei ricercatori e dei progettisti. La virtualizzazione della Grotta di Lamalunga non deve in alcun modo essere intesa come mera operazione di spettacolo o come un'apertura al pubblico per scopi puramente ricreativi, bensì come una forma di democratizzazione controllata dell'accesso al sapere, in cui la conoscenza è mediata da strumenti tecnologici progettati appositamente per garantire la tutela assoluta dell'integrità fisica del sito originario (fig. 8). Ogni scelta compiuta nel processo di rappresentazione, dalla gestione delle sorgenti luminose virtuali alla resa materica delle superfici calcaree, incide profondamente sulla percezione culturale e scientifica del luogo. Per questo motivo, il progetto adotta un approccio improntato al massimo rigore e alla trasparenza metodologica, mantenendo sempre chiaramente distinguibili il dato oggettivo acquisito attraverso il rilievo funzionale ad una sua ottimale conservazione, l'ipotesi interpretativa derivante dai modelli geofisici e la simulazione necessaria alla navigazione nell'ambiente virtuale.

La prossemica virtuale consente di interrogare in modo critico e consapevole il rapporto tra l'individuo e l'ambiente naturale. L'ambiente virtuale non ha l'ambizione di affermare una verità assoluta o definitiva su quanto accaduto millenni fa, ma propone scenari plausibili e scientificamente fondati, capaci di stimolare nuove e fertili domande di ricerca e di educare il pubblico al valore inestimabile della conservazione del patrimonio fragile. Il digitale si pone dunque come un potente alleato della tutela,

Figure 8
Il labirinto virtuale della
Grotta di Lamalunga
tra scienza, memoria e
rappresentazione immersiva.

assumes a fundamentally spatial and embodied dimension. Deep time is no longer conveyed through static images or purely chronological texts but becomes perceptible through the dynamic relationship between distances traversed and thresholds crossed, restoring to the observer the processual nature of environmental transformations that have occurred over tens of thousands of years.

Virtual representation allows these transformations to be visualized as progressive dynamics, making observable phenomena that, in the real world, would be too slow, fragmented, or spatially inaccessible to be perceived. This advanced mode of engagement inevitably entails a precise and inescapable ethical responsibility for researchers and designers. The virtualization of the Lamalunga Cave must not be conceived as a form of spectacle or as a public opening for purely recreational purposes, but rather as a controlled democratization of access to knowledge, where understanding is mediated through technological tools specifically designed to ensure the absolute preservation of the physical integrity of the original site (fig. 8).

Every decision made in the representation process – from the management of virtual light sources to the material rendering of limestone surfaces – deeply influences the cultural and scientific perception of the site. For this reason, the project adopts an approach grounded in maximum rigor and methodological transparency, clearly distinguishing between the objective data acquired through survey (functional to optimal conservation), the interpretative hypotheses derived from geophysical models, and the simulations required for navigation within the virtual environment.

Virtual proxemics enables a critical and conscious exploration of the relationship between the individual and the natural environment. The virtual environment does not aim to assert an absolute or definitive truth about events that occurred millennia ago; rather, it proposes plausible, scientifically grounded scenarios that can stimulate new research questions and foster public awareness of the invaluable importance of preserving fragile heritage. In this sense, digital technologies

act as a powerful ally in conservation, offering a sustainable alternative to physical access, which, in the case of Lamalunga, would inevitably lead to the degradation of both the environment and its remains.

7. Conclusions: Representation as a Resilient Image of Inaccessible Heritage

The contribution does not merely document a case study or report scientific advances and discoveries; it also proposes a methodological reflection on the role of representation in inaccessible contexts. The multidisciplinary research conducted on the Lamalunga Cave and the Altamura Man – culminating in the most recent geophysical investigations and extended reality experiments in 2026 – outlines a scientific framework in which digitization can no longer be considered merely an auxiliary documentation tool or an aesthetic visualization technique. Rather, it emerges as an inherently complex and foundational knowledge process, capable of radically redefining the methodological foundations for studying complex and inaccessible archaeological sites. In this advanced context, technology is not an end in itself, but the privileged means through which the Science of Representation reaffirms its critical and social role within contemporary culture. The systemic integration of three-dimensional surveying, interpretative modeling, and deep geophysical prospections – reinterpreted from an archaeological perspective – makes it possible to overcome a fragmented and partial view of the past, offering instead a coherent, unified, and scientifically grounded understanding of the relationship between the intrados of the cavities and the extrados of the Murgia landscape.

The formulation of hypotheses about the original access to the cave – based on the rigorous integration of georadar data, laser surveys, and digital reconstructions – marks the first outcome of this innovative research approach. It is not a definitive answer but rather a dynamic knowledge device that continually generates new questions and paves the way for targeted, informed future archaeological investigations. One of the most significant theoretical outcomes of this work lies in recognizing digital

offrendo un'alternativa sostenibile alla fruizione fisica che, nel caso di Lamalunga, comporterebbe un degrado dell'ambiente e dei reperti.

7. Conclusioni: la rappresentazione come immagine resiliente del patrimonio inaccessibile

Il contributo non si limita a documentare un caso di studio e riportare avanzamenti e scoperte scientifiche, ma propone anche una riflessione metodologica sul ruolo della rappresentazione nei contesti inaccessibili. Le ricerche multidisciplinari condotte sulla Grotta di Lamalunga e sull'Uomo di Altamura, culminate nelle recenti indagini geofisiche e nelle sperimentazioni di realtà estesa del 2026, delineano un quadro scientifico in cui la digitalizzazione non può più essere considerata un semplice strumento di documentazione accessoria o una tecnica di visualizzazione estetica. Essa si configura come un processo conoscitivo intrinsecamente complesso e fondativo, capace di ridefinire radicalmente le basi metodologiche su cui si fonda lo studio dei siti archeologici complessi e inaccessibili. In questo contesto d'avanguardia, la tecnologia non agisce come un fine a sé stessa, bensì come il mezzo privilegiato attraverso cui la Scienza della rappresentazione riafferma con forza il proprio ruolo critico e sociale nella cultura contemporanea. L'integrazione sistemica tra il rilievo tridimensionale, la modellazione interpretativa e le prospezioni geofisiche profonde, rilette in chiave archeologica, consente di superare la visione frammentaria e parziale del passato, restituendo una lettura unitaria, coerente e scientificamente solida del rapporto tra l'intradosso delle cavità e l'estradosso del paesaggio murgiano.

La formulazione di ipotesi sull'accesso originario alla grotta, ottenuta attraverso l'incrocio rigoroso di dati georadar, rilievi laser e ricostruzioni digitali, rappresenta un primo risultato di questo innovativo approccio di ricerca: non si tratta di una risposta definitiva, ma di un dispositivo di conoscenza dinamico che genera continuamente nuove domande e apre la strada a future indagini archeologiche mirate e consapevoli.

Uno degli esiti teorici più significativi di questo lungo lavoro consiste nel riconoscere la

rappresentazione digitale come un ambiente cognitivo. Attraverso la costruzione di ecosistemi virtuali interrogabili, la conoscenza del patrimonio inaccessibile viene resa disponibile nella sua piena e necessaria complessità, trasformando la spazialità, la prossemica e la memoria sensoriale in componenti strutturali e imprescindibili del processo di interpretazione archeologica moderna. Il confronto critico tra il gemello digitale di Lamalunga e i cloni fisici realizzati per altri siti di importanza mondiale chiarisce ulteriormente la portata rivoluzionaria di questo paradigma puramente digitale. Se il modello fisico, per quanto accurato, rimane un'immagine stabile e statica al servizio della conservazione e della fruizione di massa, il gemello digitale della grotta di Altamura emerge come una vera e propria immagine resiliente, un'entità informativa capace di integrare dati scientifici e di accogliere scenari interpretativi differenti senza mai perdere la propria coerenza e affidabilità originaria. Nel quadro della riflessione proposta dalla *call* di «XY», questa esperienza dimostra con chiarezza che la digitalizzazione del patrimonio archeologico è, prima di tutto, un processo culturale di altissima mediazione tra il rigore della scienza, la potenza della tecnologia e le necessità della società di accedere alla propria memoria storica in chiave di conservazione del bene culturale. Il contributo proposto non si limita a documentare un caso studio, ma definisce un approccio metodologico per la rappresentazione del patrimonio inaccessibile. L'integrazione tra rilievo digitale, modellazione interpretativa e indagini geofisiche consente di superare una visione frammentaria del passato, restituendo un sistema conoscitivo unitario, dinamico e verificabile. Il gemello digitale di Lamalunga non è una semplice replica, ma un'infrastruttura cognitiva in grado di integrare dati eterogenei, accogliere scenari interpretativi e supportare nuove ipotesi di ricerca. In questo senso, la rappresentazione si configura come un dispositivo epistemico, capace di trasformare lo spazio in conoscenza e la conoscenza in esperienza. Il digitale non è un semplice strumento: è il linguaggio attraverso cui il tempo profondo torna a essere pensabile, interrogabile e condivisibile.

representation as a cognitive environment. Through the construction of interrogable virtual ecosystems, knowledge of inaccessible heritage becomes available in its full and necessary complexity, transforming spatiality, proxemics, and sensory memory into essential components of modern archaeological interpretation. The critical comparison between the Lamalunga digital twin and the physical replicas created for other world-renowned sites further highlights the revolutionary nature of this purely digital paradigm. While physical models, however accurate, remain stable, static representations serving conservation and mass dissemination, the digital twin of the Altamura cave emerges as a truly resilient image – an informational entity capable of integrating scientific data and accommodating multiple interpretative scenarios without ever losing its original coherence and reliability. Within the framework of the “XY” call, this experience clearly demonstrates that the digitization of archaeological heritage is, above all,

a cultural process of high-level mediation between scientific rigor, technological potential, and society’s need to access its historical memory in a conservation-oriented perspective. The proposed contribution, therefore, goes beyond documenting a case study, defining a methodological approach to representing inaccessible heritage. The integration of digital surveying, interpretative modelling, and geophysical investigations enables overcoming a fragmented view of the past, restoring a unified, dynamic, and verifiable knowledge system. The Lamalunga digital twin is not a simple replica, but a cognitive infrastructure capable of integrating heterogeneous data, accommodating interpretative scenarios, and supporting new research hypotheses. In this sense, representation becomes an epistemic device, capable of transforming space into knowledge and knowledge into experience. The digital is not merely a tool: it is the language through which deep time becomes once again thinkable, interrogable, and shareable.

Acknowledgements

The digitization activities (Scientific Coordinator Prof. Fabrizio Banfi – Politecnico di Milano – Dept. ABC) were carried out with funding from the Italian Ministry of Culture, within the framework of the cost appraisal no. 6/2022 of the Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio for the Metropolitan City of Bari: *ALTAMURA (BA) – Interventions to improve protection and safety conditions of the paleoanthropological site of the Lamalunga Cave in Altamura (BA) – Cap. 7433/2. P.O. LL. PP. 2020 – D.M. 31 December 2020 Rep. 618*. Sole Responsible for the Procedure: Dr. Angelica Montedoro (administrative officer of the Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e

Paesaggio for the Metropolitan City of Bari), to whom our thanks are extended. We also thank Dr. Luigi La Rocca (General Director DG-ABAP of the Ministry of Culture), Arch. Maria Piccarreta (Regional Secretary of the Ministry of Culture for Apulia), Dr. Francesca Radina (former archaeologist official of the Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio for the Metropolitan City of Bari), and Geom. Cosimo Milone (former technical officer of the same Soprintendenza). Finally, we thank the speleologists of the Centro Altamurano Ricerche Speleologiche (CARS) and the many scholars who, over the years, have contributed to the knowledge of the cave.

Ringraziamenti

I lavori di digitalizzazione (Responsabile Scientifico prof. Fabrizio Banfi – Politecnico di Milano – Dip. ABC) sono stati realizzati con il finanziamento del Ministero della Cultura, nell’ambito della perizia di spesa n. 6/2022 della Soprintendenza Archeologia, belle arti e paesaggio per la città metropolitana di Bari *ALTAMURA (BA) - Interventi di miglioramento delle condizioni di tutela e sicurezza del sito paleoantropologico della Grotta di Lamalunga in Altamura (BA) - Cap. 7433/2. P.O. LL. PP. 2020 - D.M. 31 dicembre 2020 Rep. 618*, Responsabile Unico del Procedimento dott.ssa Angelica Montedoro (funzionario amministrativo della Soprintendenza Archeologia, belle

arti e paesaggio per la città metropolitana di Bari), che si ringrazia.

Si ringraziano inoltre il dott. Luigi La Rocca (Direttore Generale DG-ABAP del Ministero della Cultura), l’arch. Maria Piccarreta (Segretario regionale del Ministero della Cultura per la Puglia), la dott.ssa Francesca Radina (già funzionario archeologo della Soprintendenza Archeologia, belle arti e paesaggio per la città metropolitana di Bari), il geom. Cosimo Milone (già funzionario tecnico della medesima Soprintendenza).

Si ringraziano, infine, gli speleologi del Centro Altamurano Ricerche Speleologiche (CARS) e i numerosi studiosi che, nel corso degli anni, hanno contribuito alla conoscenza della grotta.

References / Bibliografia

- AGOSTINI S. (2010), *Lineamenti geomorfologici della Grotta di Lamalunga*, «Dire in Puglia», 2, pp. 17-21.
- BANFI F., DELLÙ E., CACUDI G. (2025), *Archeologia virtuale per la ricostruzione dell’Uomo di Neanderthal e la conservazione della Grotta di Lamalunga / Virtual Archaeology for the Reconstruction of the Neanderthal Man and the Conservation of the Lamalunga Cave*, in CARLEVARIS L., CALISI D., BAGLIONI L., BIANCHINI C., CINCIANI M., CIANCI M.G., FARRONI L. et al., a cura di, *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione / èkphrasis. Descriptions in the space of representation*, atti del convegno (Roma, 11-13 settembre 2025), Milano, FrancoAngeli, pp. 2255-2278.
- BANFI F., DELLÙ E., STANGA C., MANDELLI A., RONCORONI F., SIVILLI S., CACUDI G. (2023), *Representing intangible cultural heritage of humanity: from the deep abyss of the past to digital twin and XR of the Neanderthal man and Lamalunga cave (Altamura, Apulia)*, «The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences», 48, pp. 171-181.
- BRANCA M., VOLTAGGIO M. (2010), *Studi cronologici eseguiti sulle concrezioni carbonatiche della Grotta di Lamalunga*, «Dire in Puglia», 2, pp. 55-60.
- CACUDI G., DELLÙ E., BANFI F., RINALDI T., QUAGLIARIELLO A., PEPE G., TENORE A. (2024), *La Grotta di Lamalunga (Altamura-BA). Dal reperto alla complessità del contesto attraverso nuovi approcci transdisciplinari*, «Restauro Archeologico», 32 (2), pp. 206-211.
- CARAMELLI D., LARI M., RIZZI E., BALSAMO C., GIGLI E., CORTI G., MILANI L., et. al. (2010), *Analisi paleogenetica del Neanderthal di Altamura*, «Dire in Puglia», 2, pp. 45-54.
- CHAMPION E. (2021), *Virtual Heritage: A Guide*, London, Ubiquity Press.
- DI VINCENZO F., LARI M., BORSATO A., GHIROTTI S., MICHELI M., BALSAMO C., COLLINA C. et al. (2017), *L’uomo di Altamura, vent’anni dopo: nuove ricerche sullo scheletro della Grotta di Lamalunga (Altamura, Bari)*, «Studi di Preistoria e Protostoria», 4, pp. 181-190.
- GIACOBINI G., TAGLIACCOZZO A., MANZI G. (2010), *Lo scheletro umano e i reperti faunistici della Grotta di Lamalunga: considerazioni tafonomiche*, «Dire in Puglia», 2, pp. 27-32.
- GONZÁLEZ MORALES M., STRAUS L.G. (2009), *Altamira and its archaeological heritage: conservation, replication and public access*, Santander, Museo de Altamira.
- HALL E.T. (1966), *The hidden dimension*, Garden City.
- HUGGETT J. (2020), *Virtually Real or Really Virtual. Towards a Heritage Metaverse*, «Studies in Digital Heritage», 4 (1), pp. 1-15.
- LARI M., DI VINCENZO F., BORSATO A., GHIROTTI S., MICHELI M., BALSAMO C., COLLINA C. (2015), *The Neanderthal in the karst: first dating, morphometric, and paleogenetic data on the fossil skeleton from Altamura (Italy)*, «Journal of Human Evolution», 82, pp. 88-94.
- MASSARI G.A. (1998), *Misurare interpretare conoscere*, «XY dimensioni del disegno», 32-33, pp. 5-18.
- REILLY P. (1991), *Towards a virtual archaeology*, in LOCKYEAR K., RAHTZ S., a cura di, *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1990*, Oxford, BAR Publishing, pp. 132-139.