

Archeologia virtuale per la ricostruzione dell’Uomo di Neanderthal e la conservazione della Grotta di Lamalunga

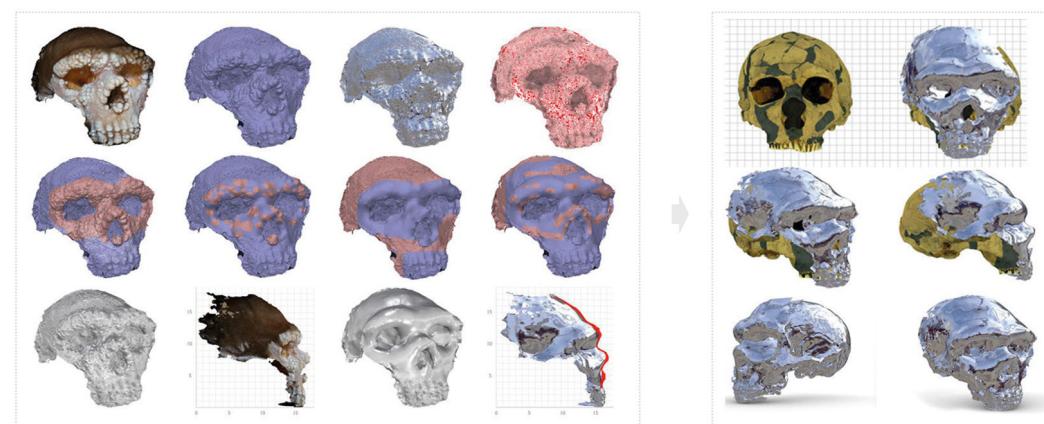
Fabrizio Banfi
Elena Dellù
Giovanni Cacudi

Abstract

Negli ultimi anni, l’impiego di tecnologie avanzate, tra cui il rilievo digitale, la modellazione tridimensionale e la realtà estesa, ha consentito di superare le barriere fisiche e temporali, offrendo soluzioni innovative per l’analisi e la fruizione remota di siti e reperti archeologici altrimenti inaccessibili al grande pubblico. Un esempio significativo di tale applicazione è rappresentato dallo studio dei resti dell’Uomo di Neanderthal rinvenuti nella Grotta di Lamalunga, in Puglia, un sito di rilevante valore archeologico e paleoantropologico oggetto della presente ricerca. Avviato nel 2022, il progetto promosso dalla Soprintendenza ABAP per la Città Metropolitana di Bari ha portato alla realizzazione di gemelli digitali ad altissima risoluzione dei resti, della grotta e dell’intero contesto ambientale, favorendo tanto l’accessibilità virtuale quanto la conservazione del sito. L’integrazione della realtà virtuale (VR) e della tecnologia web-XR ha facilitato la creazione di nuove forme di conoscenza e inclusività. Il presente studio illustra i risultati più recenti in questi ambiti, collocandosi all’interno di un settore di ricerca in continua evoluzione, quale l’archeologia virtuale. In particolare, lo sviluppo di un’interfaccia virtuale interattiva e di una nuova applicazione VR ha consentito di supportare le analisi antropologiche e le fasi di mappatura tridimensionale dei resti ossei in chiave conservativa, permettendo l’applicazione di metodologie avanzate di rimozione virtuale dei depositi calcitici e gettando le basi per la ricostruzione originale del cranio.

Parole chiave

Archeologia virtuale, Neanderthal, interpretazione, 3D modelling, Virtual Reality (VR).



"Archaeology is not what you find, it's what you find out."
David Hurst Thomas

Introduzione

La Scienza della Rappresentazione, in simbiosi con l'evoluzione delle tecnologie di rilievo digitale, modellazione tridimensionale e Realtà Estesa (XR), ha aperto interessanti prospettive nell'affrontare nuove sfide nel campo dell'archeologia virtuale. Questo incontro sinergico tra scienza e innovazione ha dato vita a metodologie analitiche sempre più sofisticate, restituendo una comprensione profonda dei fenomeni studiati e rivelando dinamiche ontologiche e diacroniche del patrimonio culturale. In tale contesto, principi fondamentali come sostenibilità, accessibilità, comunicazione e inclusione sono emersi come pilastri imprescindibili, stimolando nuove linee di ricerca.

In questa evoluzione, l'archeologia virtuale si configura come punto di convergenza tra la matrice culturale e le moderne tecnologie digitali, generando esperienze caleidoscopiche di interazione e riflessione. Il termine 'archeologia virtuale', coniato da Paul Reilly nel 1990, inizialmente indicava l'impiego di modelli tridimensionali per la rappresentazione di monumenti, siti archeologici e reperti [Reilly 1991, pp.132-139]. Con il tempo, il concetto di 'virtuale' si è ampliato, includendo una molteplicità di rappresentazioni fruibili attraverso tecnologie avanzate. Grazie al rilievo digitale, alla modellazione 3D, alla Realtà Aumentata (AR) e alla Realtà Virtuale (VR), è possibile oggi creare ricostruzioni interattive e immersive di siti e reperti archeologici. Tali simulazioni, realizzabili talvolta anche in tempo reale, permettono l'esplorazione visiva e sensoriale di luoghi e resti altrimenti inaccessibili, danneggiati o distrutti, aprendo nuove frontiere nella conservazione del patrimonio [Banfi 2023].

In questo contesto, la tecnologia si fa interprete della relazione tra passato e presente, agendo come un sillogismo ermeneutico in grado di mediare il legame temporale e spaziale tra le varie epoche. Essa consente, se ben indirizzata, di cogliere il valore di ogni reperto in un contesto diacronico, rivelando la mutevole e frattale natura dei processi storici che confluiscano in essi.

Un esempio emblematico di questa applicazione è lo studio dei resti dell'Uomo di Neanderthal e della Grotta di Lamalunga, in Puglia (fig. 1). Conosciuta per la presenza di un *Homo neanderthalensis* risalente a $172 \pm 15 - 130,1 \pm 1,9$ migliaia di anni fa (U-Th), la grotta è accessibile solo a professionisti e studiosi per garantire la tutela del sito.

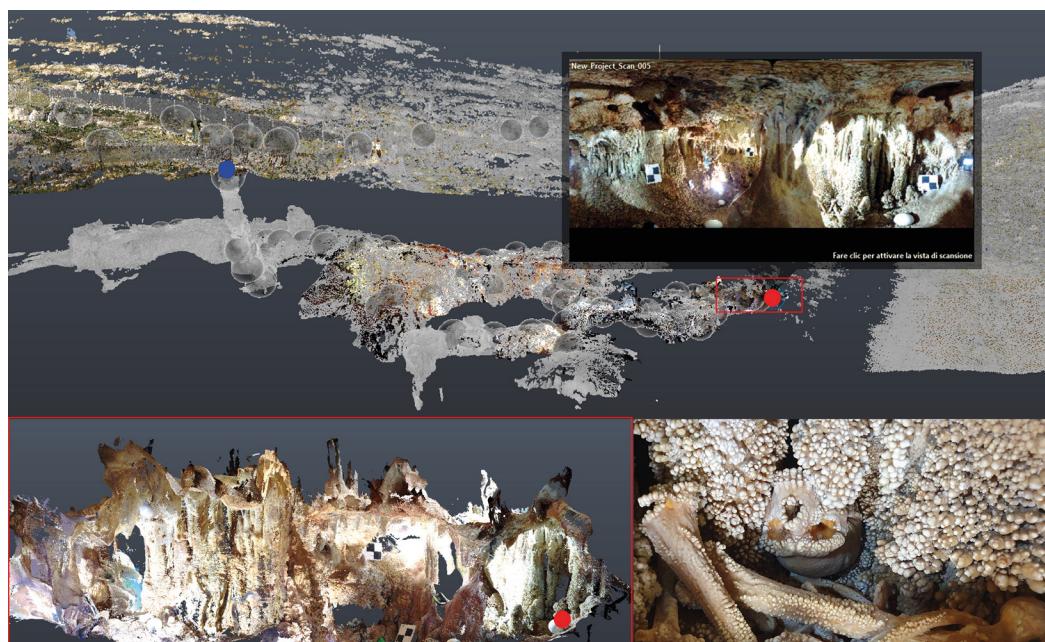


Fig. 1. L'abside dell'Uomo di Neanderthal. In rosso: i suoi resti ossei; in blu: ingresso della grotta di Lamalunga. Dati di rilievo laser scanning della campagna del 2022.

A partire dal 2022 la Soprintendenza ABAP di Bari ha diretto un progetto innovativo di ricerca a carattere transdisciplinare finalizzato all'incremento conservativo applicando un metodo di conoscenza 'globale', ossia una messa in atto di tutte le discipline utili ad una comprensione diacronica degli eventi naturali e storico-culturali che hanno interessato il comparto territoriale della grotta, e al contempo di metodologie a carattere tecnico-strumentale e microbiologico, funzionali alle valutazioni di eventuali forme di biodegrado (coordinamento arch. G. Cacudi, direzione scientifica antrop. E. Dellù) [1].

Il laboratorio *Glcarius-ABC Lab* del Politecnico di Milano (direzione prof. F. Banfi) ha, nello specifico, supervisionato il rilievo e la digitalizzazione dei dati, con il supporto operativo del Centro Altamurano Ricerche Speleologiche (CARS). Il rilievo topografico, laser scanning e fotogrammetrico hanno portato alla creazione di modelli digitali ultra-dettigliati in grado di rispondere efficacemente alle esigenze di accessibilità virtuale e permettendo allo stesso tempo analisi scientifiche senza compromettere l'integrità del sito [Cacudi et al. 2024, p. 206].

Un aspetto centrale degli studi condotti fin qui è stato l'uso di modelli digitali e l'integrazione di quest'ultimi con la VR e web-XR, a supporto dell'indagine conoscitiva del sito, la tutela dei suoi inestimabili resti e una comunicazione inclusiva in grado di includere una fruizione più ampia e interattiva del patrimonio, sia di esperti e studiosi che turisti virtuali [Banfi et al. 2023, Banfi et al. 2024, pp. 1-20].

Nel corso dell'ultimo anno, la ricerca si è concentrata nello sviluppo di un ambiente virtuale interattivo, progettato specificamente per rispondere alle esigenze degli antropologi e degli archeologi, concentrati sull'analisi morfologica originale dei resti dell'uomo di Neanderthal (fig. 2), sui processi tafonomici e diagenetici intercorsi dal momento della decomposizione dell'individuo sino ad oggi, alle stratificazioni geologiche formatesi nei millenni, sino a monitoraggi di medio-lungo periodo delle condizioni conservative dell'intero contesto carsico.



Fig. 2. Il cranio dell'uomo di Neanderthal e i dettagli dei sedimenti.

Questo studio, pertanto, si inserisce in un campo ancora parzialmente inesplorato, con l'obiettivo di fornire metodi e strumenti digitali innovativi in grado di affrontare le sfide emergenti nella conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale, in particolare nei settori dell'archeologia e dell'antropologia. Attraverso la Scienza della Rappresentazione, la ricerca ha applicato tecnologie avanzate per rispondere alle sfide contemporanee legate alla protezione dei resti dell'Uomo di Neanderthal in rapporto all'intero contesto carsico, promuovendo nuove modalità di analisi interattiva e accessibilità virtuale, inclusione e sostenibilità.

Un aspetto centrale di questo approccio è stato lo studio dettagliato del cranio dell'Uomo di Neanderthal, utilizzato come elemento cardine d'analisi sperimentale in chiave digitale, a cui faranno seguito nuovi sviluppi su ulteriori reperti.

Metodologie avanzate per la ricostruzione 3D dei resti dell'uomo di Neanderthal

Da un punto di vista metodologico, la fase di rilievo e digitalizzazione intrapresa nel 2023 ha comportato la creazione di modelli *mesh* fotogrammetrici texturizzati ad altissima risoluzione, in grado di catturare tutte le peculiarità morfologiche superficiali dei resti. L'obiettivo principale era ottenere elevati livelli di dettaglio e informazioni, scomponendo i modelli in sotto-elementi in grado di rappresentare entità semantiche texturizzate manipolabili in ambiente virtuale. L'approccio adottato si è imposto di superare le limitazioni degli strumenti digitali automatici, tipici delle applicazioni di fotogrammetria digitale che, pur facilitando la trasformazione di punti spaziali in *mesh*, mancano di flessibilità nel generare sotto-elementi rilevanti per l'analisi e l'interpretazione dei dati. L'uso del software di reverse engineering, *Geomagic Design X*, ha consentito di correggere errori comuni nelle *mesh* e di applicare comandi come 'MeshToNurb'. Il processo ha incluso la correzione di errori topologici, come auto-intersezioni e geometrie ridondanti, e la creazione di modelli 'watertight', pronti per manipolazioni successive. Tale trasformazione di superfici *mesh* in modelli NURBS ha ridotto il carico computazionale e ottimizzato l'efficienza del processo di modellazione volumetrica, garantendo una rappresentazione fedele dei dettagli più complessi.

Per ottenere i migliori risultati in termini modellativi sono stati testati e utilizzati vari software di retopologia, come *ZBrush*, *3D-Coat*, *InstantMeshes*, *Rhinoceros* e *Blender*. Quest'ultimo con i suoi strumenti 'Remesh' e 'RetopoFlow', ha agevolato la creazione di nuove topologie, migliorando la modellazione stessa delle ossa. Un aspetto significativo è stata l'integrazione delle tecniche di disegno 3D basato su algoritmi *Non-Uniform Rational B-Splines* (NURBS), risolvendo il divario generativo senza compromettere le fasi di analisi, interpretazione e manipolazioni puntuali del dato. Per ottenere la ricostruzione virtuale dei reperti ossei dell'uomo di Neanderthal, con particolare attenzione alla rimozione delle concrezioni calcaree formatesi nel corso dei millenni, il disegno 3D è stato un passaggio fondamentale (fig. 3). La letteratura evidenzia che la natura fisica delle nuvole di punti e dei modelli *mesh* non permette una trasformazione diretta in oggetti semanticici, rendendo cruciale l'intervento umano nell'interpretazione dei dati e nella determinazione delle discontinuità tra le ossa analizzate. L'approccio metodologico adottato, il quale ha combinato il disegno 3D e la modellazione NURBS, ha permesso di gestire correttamente le due principali entità geometriche: i resti ossei e le irregolarità calcitiche che li ricoprivano. Prima di rimuovere le concrezioni, è stata effettuata una rigorosa verifica della precisione del metodo. Il processo ha permesso di definire un approccio in grado di supportare il disegno 3D realizzato direttamente sui reperti, evitando errori di modellazione o mappature errate delle varie unità stratigrafiche che via via venivano individuate. Grazie agli strumenti di interpolazione NURBS e disegno 3D in software come *Rhinoceros* e *Blender*, è stato possibile quindi scomporre il modello in unità stratigrafiche (US) 3D, aggiornabili e modificabili disegnando digitalmente direttamente sulle ricostruzioni tridimensionali. Il processo di interpretazione, disegno e mappatura ha, inoltre, portato alla creazione di elementi geometrici puntuali delle varie US, facilmente rimovibili tramite operazione di lisciatura, taglio, sottrazione e omogeneizzazione delle superfici. Un sistema di verifica automatica infine ha calcolato la fedeltà geometrica dei modelli, misurando la deviazione standard tra il modello iniziale e quello finale, validando così la morfologia ossea.

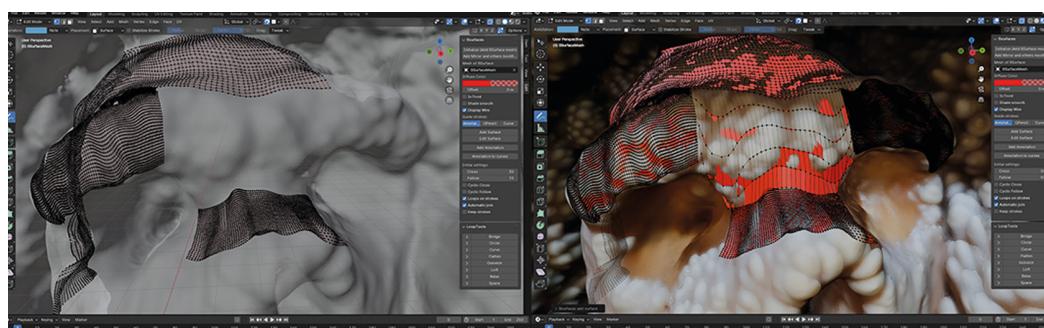


Fig. 3. Il modello NURBS ha previsto una prima fase di conversione da *mesh* a superfici NURBS in *Geomagic Design X* e la successiva modellazione 3D per microaree in *Blender*. Tramite l'analisi, l'interpretazione e il disegno 3D direttamente sul modello NURBS del cranio è stato possibile procedere con la successiva rimozione a progressiva rimozione dei sedimenti.

ottenuta. Avvalendosi di tecniche di modellazione 3D avanzata e applicazioni di VR-AR, dell'interpolazione di punti di dati di rilievo 3D basata su algoritmi NURBS, del disegno 3D, retopologia e modelli *mesh* ad altissima risoluzione, questo processo ha permesso di sperimentare gradualmente la ricostruzione della morfologia originaria del cranio epurata delle concrezioni calciche, offrendo una visione più precisa, analitica e dettagliata di un reperto di inestimabile valore culturale e biologico.

La grotta di Lamalunga e i suoi reperti

L'analisi dell'uomo di Altamura offre l'opportunità di esplorare aspetti dell'evoluzione umana che altrimenti resterebbero sconosciuti. Questo straordinario reperto è custodito tra le concrezioni carsiche che, nel corso di millenni, lo hanno avvolto e preservato. La grotta di Lamalunga, situata sull'altopiano delle Murge a meno di 500 m s.l.m., a nord-est di Altamura (40°49'N, 16°33'E), costituisce la parte superiore di un ampio sistema carsico, articolato in due rami principali. Al suo interno si trovano stalattiti, stalagmiti, colate e formazioni 'coralloidi' [Cacudi et al. 2024, p. 206], che rappresentano l'ultima fase di precipitazione della calcite, legata a fenomeni di deposizione per vaporizzazione.

Il complesso carsico si sviluppa principalmente in due gallerie sub-orizzontali, che si estendono a breve distanza dalla superficie e convergono in un vano centrale, quasi completamente riempito da un cono detritico (fig. 4). Le gallerie sono interrotte da pozzi verticali, che in alcuni casi si aprivano verso l'esterno, ma sono stati successivamente soggetti a crolli e riempimenti. Nella cosiddetta 'Abside dell'Uomo' sono collocati numerosi resti paleoantropologici riferibili ad un unico *Homo neanderthalensis* in buono stato di conservazione, che presenta un esteso rivestimento di formazioni coralloidi di calcite, riferibili a fenomeni di deposizione che in alcuni punti lo incorporano alla formazione carsica. A livello tafonomico l'esame delle connessioni anatomiche consente di ipotizzare che l'individuo giacesse in posizione rannicchiata e, a seguito della decomposizione dei suoi tessuti molli, la gravità abbia prodotto la caduta delle singole ossa sul fondo dell'antro. Sulla superficie numerosi reperti faunistici si sono depositati in prossimità di un'importante fase di crollo inquadrabile tra 45.000 e 30.000 anni fa (U-Th), che ha condotto alla presenza di

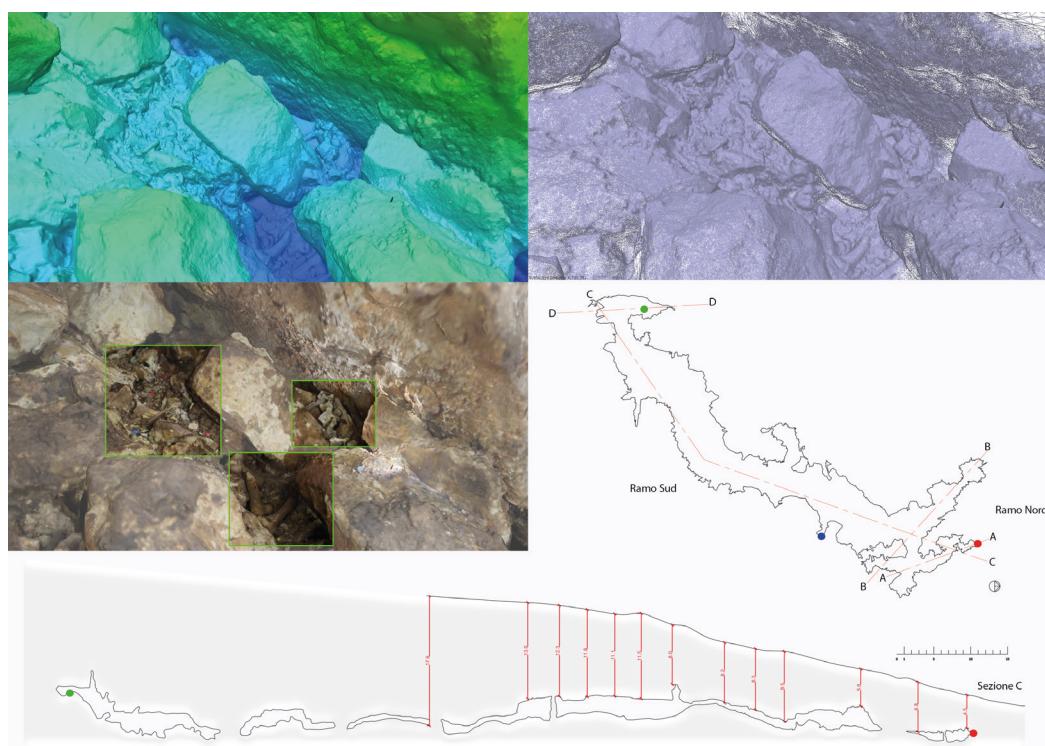


Fig. 4. In verde: i nuovi resti faunistici documentati all'interno della grotta durante le operazioni di rilievo e digitalizzazione del 2023 del ramo Sud. Il processo di digitalizzazione ha permesso di estendere la documentazione della grotta ed integrare i dati ed elaborati di rilievo della precedente campagna di rilievo del ramo Nord del 2022. In rosso: i resti dell'Uomo di Neanderthal.

ossa concrezionate da calcite sul pavimento tabulare o coperte da acqua stagnante, con sottili patine di rivestimento, incastonate o parzialmente aderenti a stalagmiti e ricoperte da infiorescenze globulari con morfologia coralloide.

Gli studi cronologici condotti sulle formazioni calcitiche in associazione a tali reperti paleontologici (U-Th) hanno consentito di inquadrare il momento di deposizione tra 45.000 e 30.000 anni fa. Gli attuali cambiamenti climatici hanno reso, più di recente, necessario mettere in atto nuovi metodi di monitoraggio a medio-lungo periodo nonché studi da remoto dell'intero ambito territoriale, funzionali a valutare eventuali biodegradi di questo patrimonio culturale eccezionale; al contempo si è ritenuto necessario aprire lo sguardo a una ricerca dal carattere 'globale' sull'intero contesto che si estenda dal Neanderthal alla grotta e al suo estradossso. Per la prima volta nella storia degli studi condotti sulla grotta, durante le campagne di rilievo e digitalizzazione del 2022 e del 2023 è stato possibile documentare con diverse tipologie di sensori e tecniche di digitalizzazione avanzata e XR numerosi resti sia del ramo Nord che del ramo Sud [Banfi et al. 2023, Banfi et al. 2024, pp. 1-20] (figg. 5, 6).

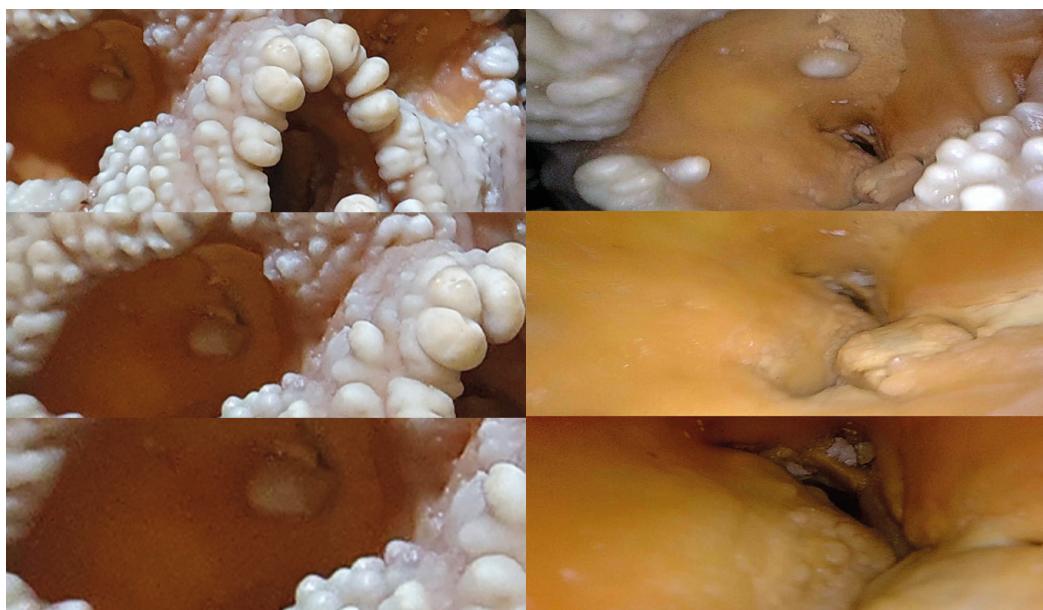


Fig. 5. Scatti eseguiti con endoscopio flessibile per l'integrazione di dati fotogrammetrici e laser scanning per la ricostruzione delle cavità esocraniche dell'Uomo di Altamura.

Il cranio e i principali resti ossei dell'uomo di Neanderthal

A seguito della scoperta del contesto paleoantropologico e faunistico avvenuta nel 1993 da parte di alcuni speleologi, la Grotta di Lamalunga è stata oggetto di indagini multidisciplinari in prevalenza volte alla comprensione del giacimento da un punto di vista conoscitivo dei reperti (quantificazioni, tassonomia, inquadramenti cronologici, indicazioni paleoclimatiche), di mappatura topografica degli stessi e di rilevamento con metodologie proprie dell'epoca. I resti ossei dell'*Homo neanderthalensis* si collocano all'estremità Nord/Est della grotta e a livello spaziale risultano variamente dislocati, con in evidenza il cranio in posizione frontale e ribaltata, ai suoi piedi numerose ossa come mandibola, radio destro, ulna (indet.), bacino destro e sinistro, femori, tibie e fibula (indet.). Posteriormente al cranio, in un antro secondario collocato a Nord e denominato 'retro abside', si evidenzia la presenza dell'omero destro e della scapola destra (quest'ultima prelevata nel 2009 per analisi genetiche). Grazie a indagini di ricerca condotte negli ultimi 15 anni sia a carattere morfologico, morfometrico e paleogenetico, è stato possibile identificare il reperto paleoantropologico come un raro esempio di Neanderthal adulto con una combinazione di caratteri derivati (come quelli di *Homo neanderthalensis*) e plesiomorfici (come quelli di *Homo heidelbergensis*), il cui inquadramento cronologico è da individuare tra il Pleistocene Medio e il Superiore, più specificamente tra 172 ± 15 e $130,1 \pm 1,9$ migliaia di anni fa [Caramelli et al. 2010, pp. 45-54; Lari et al. 2015,

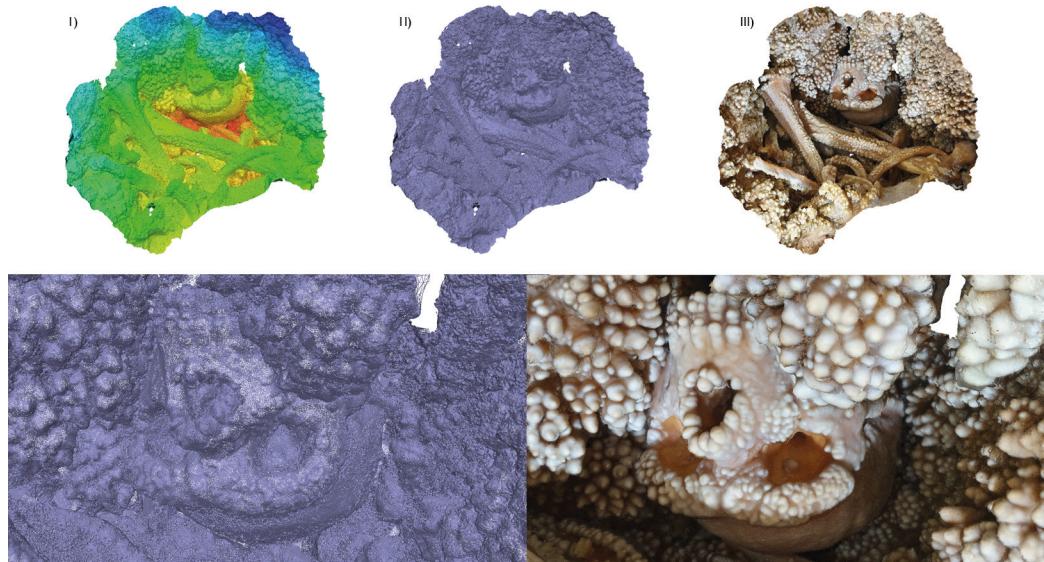


Fig. 6. Output fotogrammetrici dei resti dell'Uomo di Neanderthal.
1. nuvola di punti;
2. modello mesh;
3. modello mesh texturizzato.

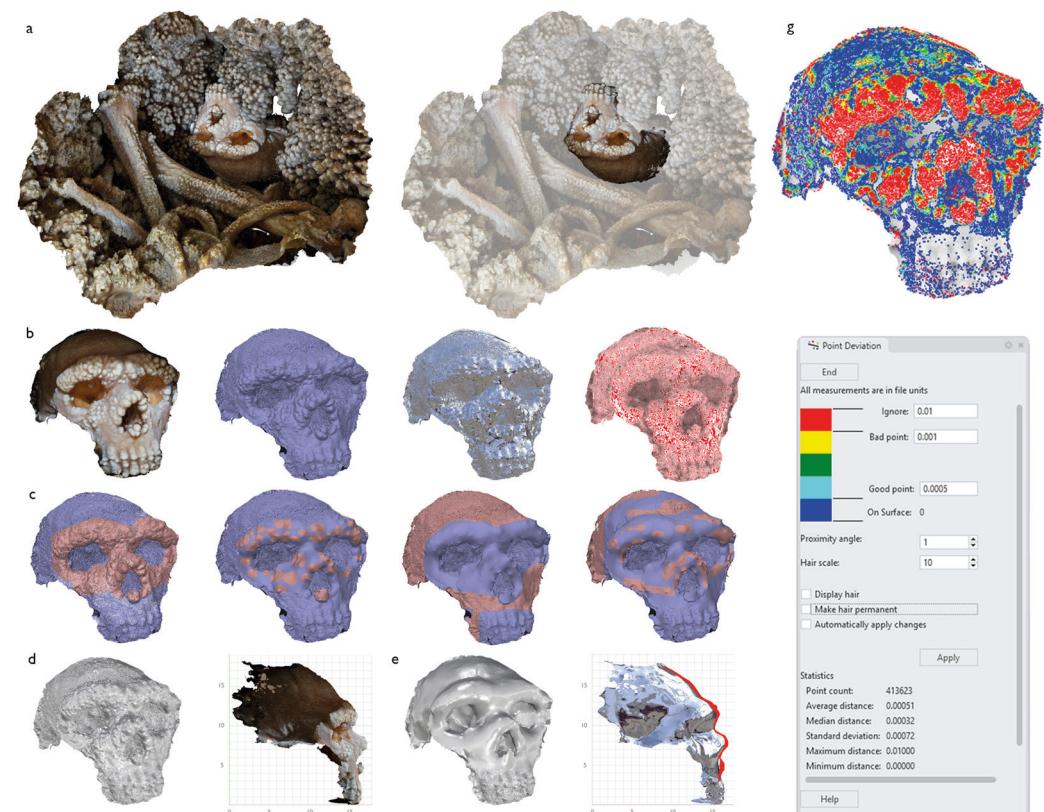


Fig. 7. Il processo di ricostruzione del cranio dell'uomo di Neanderthal:
a. estrazione virtuale;
b. da sinistra a destra: modello texturizzato, modello NURBS, mappa ambiente e zebra;
c. individuazione delle principali aree di trattamento;
d. comparazione geometrica;
e. il risultato ottenuto con la rimozione dei sedimenti (in rosso il profilo d);
f. analisi 3D della Deviazione Standard tra d. ed e.

pp. 88-94; Di Vincenzo et al. 2017, pp. 181-190]. A livello tafonomico la situazione si mostra differente rispetto a quella dei resti faunistici, in quanto si osserva la presenza di un'alta percentuale di conservazione dei resti ossei riferibili all'individuo in una porzione ristretta della grotta, per i quali non risultano allo stato attuale visibili connessioni anatomiche strette ma lasse. Sembra, infatti, verosimile che l'individuo giacesse in posizione rannicchiata e a seguito della decomposizione dei suoi tessuti molli la gravità abbia agito a sfavore del mantenimento delle connessioni articolari, facendo ricadere le stesse sul fondo dell'antro [Giacobini et al. 2010, pp. 27-32; Cacudi et al. 2024].

Le superfici ossee allo stato attuale non risultano osservabili nella loro naturale morfologia scheletrica, in quanto ricoperte da depositi calcitici di tipologia variegata e con diversa modellatura nonché spessore [Branca, Voltaggio 2010, pp. 55-60; Vanghi et al. 2010]. Il cranio, in particolar modo, presenta accentuati depositi di tipologia coralliforme che si distribuiscono prevalente sulle parti più sporgenti dello splancnocranio (massiccio faciale), quali i margini supraorbitali, le arcate sopracciliari, il processo frontale, il processo alveolare e il clivo naso-alveolare, mentre risultano meno marcati depositi distribuiti in maniera più uniforme sia nella porzione superiore dell'osso frontale che nei parietali. Analogamente si presentano le ossa del postcranio, le quali mostrano una similare distribuzione delle tipologie di depositi calcitici che risultano a morfologia coralloide nelle porzioni più esposte e connotate da sporgenze (come creste, linee, apofisi, tuberosità, ecc.), e più omogenee nelle parti più lineari. Pertanto, dato che ai fini conservativi non risulta allo stato attuale osservabile la reale morfologia ossea dei vari distretti scheletrici in quanto avvolti dalle formazioni calcitiche, la sperimentazione digitale esposta in questa sede sta consentendo di effettuare una rimozione stratigrafica virtuale dei depositi sedimentatisi nel corso dei millenni (fig. 7). Per questi motivi, disporre di uno strumento intuitivo e allo stesso tempo immersivo, capace di supportare in modo preciso le fasi di mappatura 3D delle principali unità stratigrafiche, risulta fondamentale per porre le basi di una ricostruzione virtuale dell'uomo di Neanderthal. Tale approccio consente non solo una rappresentazione accurata degli ambienti e dei reperti, ma offre anche l'opportunità di esplorare dinamicamente e interattivamente il passato, favorendo una comprensione e accessibilità più profonda delle dinamiche tafonomiche e diagenetiche avvenute sui resti dell'individuo, nonché – su più larga scala, estendendo il processo a porzioni significative del contesto carsico – di ordine archeologico e di interazione tra Uomo-Ambiente. La possibilità di combinare dati tridimensionali con simulazioni interattive rappresenta un passo cruciale anche nell'approfondimento delle conoscenze sull'evoluzione.

L'appVR per l'analisi dei reperti ossei dell'uomo di Neanderthal

Il valore delle applicazioni VR sviluppate in questo contesto si evidenzia principalmente in termini di accessibilità e facilità di utilizzo. A differenza degli approcci tradizionali, in cui si richiedevano applicativi complessi o piattaforme di modellazione 3D, il nuovo ambiente virtuale interattivo (IVE) è stato progettato per ridurre al minimo le barriere tecnologiche e consentire un accesso immediato a tutti gli utenti, senza la necessità di competenze specifiche o di hardware avanzato. L'adozione di due modalità di fruizione – Web-VR e App VR locale – rappresenta un significativo passo avanti in termini di versatilità e compatibilità. L'applicativo Web-VR sviluppato consente l'accesso diretto tramite un semplice browser e un QR code, non richiedendo alcuna installazione aggiuntiva, rendendolo particolarmente adatto per chi ha bisogno di un accesso rapido e semplificato tramite dispositivi di uso comune come cellulari, *pad*, *laptop* o *desktop*, senza dipendere dal sistema operativo. I contenuti vengono automaticamente aggiornati, il che semplifica la gestione, ma con il limite delle prestazioni che, pur ottimali, dipendono dalla qualità della connessione internet e dalla potenza del browser utilizzato. Dall'altro lato, l'App VR locale è stata sviluppata per offrire prestazioni superiori e un'esperienza più immersiva, sfruttando appieno le risorse hardware del dispositivo e ottimizzando l'interazione con visori VR avanzati, come il Meta Quest 3. La qualità grafica migliorata e l'ottimizzazione per sistemi operativi specifici consentono una visione più dettagliata e una navigazione fluida all'interno dell'IVE, anche per operazioni avanzate come l'analisi dei resti ossei o il confronto con reperti archeologici. Inoltre, questa ottimizzazione tecnologica ha permesso di condurre analisi avanzate sulle concrezioni ossee, grazie a modelli 3D ad alta definizione che possono essere esplorati in modalità VR e anche tramite l'integrazione di videoproiettori per includere una platea più ampia (figg. 8,9). Le modalità di visualizzazione VR, che includono diverse opzioni di rendering e analisi, rendono quindi entrambi gli sviluppi condotti uno strumento non solo accessibile ma anche estremamente potente per gli studi morfologici e antropometrici.



Fig. 8. Lo sviluppo di un ambiente virtuale interattivo ha permesso di ottenere diverse modalità di interazione e immersione. Sopra: l'app VR permette un'esperienza immersiva tramite visore VR, PC desktop e laptop; sotto: l'applicativo web-VR. Tramite l'upload dell'IVE in cloud è possibile accedere a qualsiasi tipologia di browser web ed interagire con dispositivi mobili come cellulari e tablet.

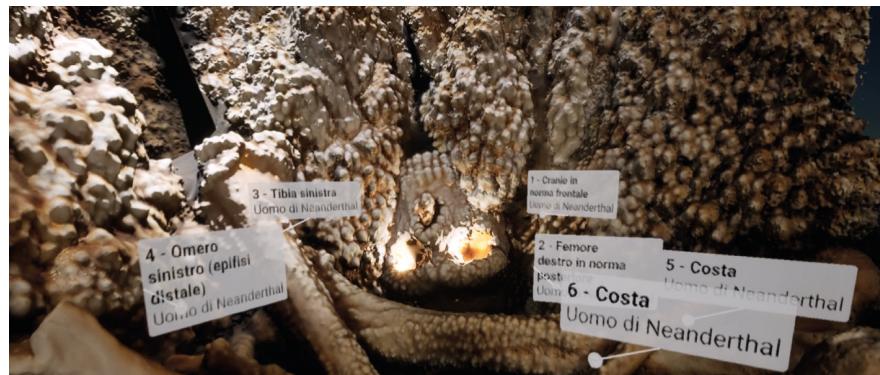


Fig. 9. L'esplorazione virtuale della ricostruzione digitale del cranio dell'uomo di Neanderthal. Tramite l'integrazione di videoproiettori e dispositivi di ultima generazione entrambi gli applicativi sviluppati (app-VR e web-VR) possono esseri condivisi a più utenti in contemporanea, permettendo così una fruizione a un pubblico più ampio.



Confronto tra il cranio di Neanderthal di La Ferrassie I e il cranio dell'Uomo di Altamura

Datato tra i 70000 e 50000 anni fa, 'La Ferrassie I' è considerato da molti scienziati l'esempio 'classico' dell'anatomia dei Neanderthal presentando molti dei tratti tipici dei Neanderthal, come la fronte bassa e inclinata e la grande apertura nasale (fig. 10). Con una capacità cranica di 1641 cm³, è il secondo cranio di ominide più grande mai scoperto, dopo quello di Amud I. L'individuo, al momento della sua morte, aveva circa 45 anni, un'età molto avanzata per un ominide così antico. Grazie all'applicativo online 'Homo neanderthalensis: cranium – National Museum of Natural History' pubblicato sul sito dell'istituto Smithsonian (il più grande complesso al mondo di musei, educazione e ricerca) e il modello 3D scaricabile gratuitamente del Museo [UV] Historia Natural di Valencia è stato possibile esplorare i resti digitalizzati del 'La Ferrassie I' e compararli con risultati di questo studio.

Il cranio dell'Uomo di Altamura non risulta allo stato attuale rilevabile in maniera completa a causa delle concrezioni calcitiche presenti che non consentono di averne una completa visione in norma latero-posteriore, per tale ragione i crani dei due individui sono stati sovrapposti al fine di compararne le morfologie e la metrica attraverso l'utilizzo dei punti

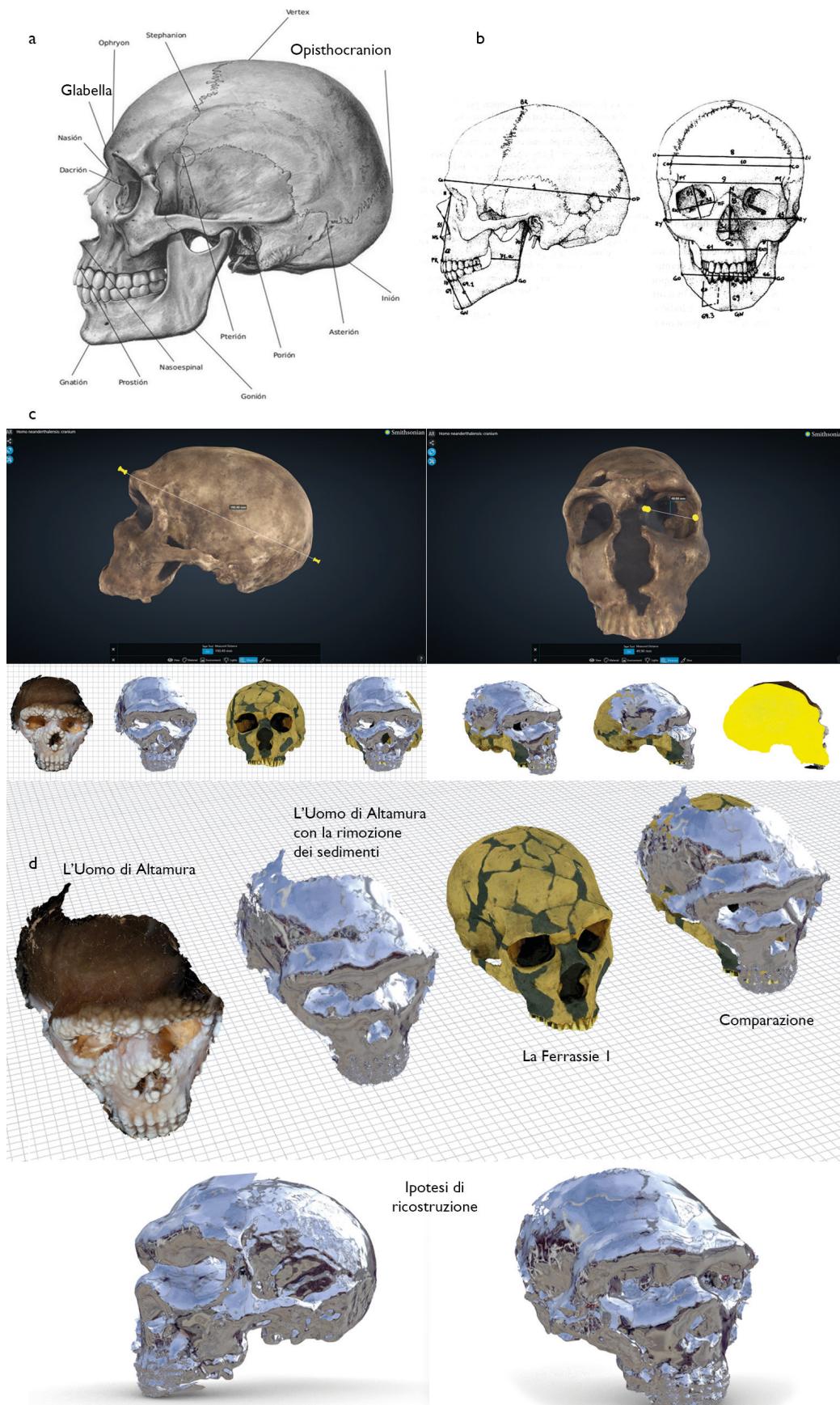


Fig. 10.
a. rappresentazione grafica esemplificativa dei punti craniometrici;
b. individuazione della lunghezza massima del cranio, ovvero la distanza in linea retta dalla glabella (situata sulla bozza frontale media, al di sopra della sutura naso-frontale – G) e all'opistocranion (punto anteriore più sporgente tra le due arcate – OP);
c. la ferrassie I –*Homo neanderthalensis: cranium* National Museum of Natural History–The Smithsonian Institution con l'individuazione della distanza 'g-op' di 19 cm;
d. da sinistra a destra: il modelli dell'Uomo di Altamura, il modello senza sedimenti, il modello di La ferrassie I (Fonte: Museo [UV] Historia Natural Valencia) e la comparazione tra questi ultimi due;
e. l'ipotesi di ricostruzione dell'Uomo di Altamura che ha previsto la fusione del modello dell'Uomo di Altamura e il modello di La ferrassie I (Fonte: Museo [UV] Historia Natural).

di repere osservabili su entrambi. Si è, quindi, sfruttato l'allineamento longitudinale 'g-op' e quello trasversale 'eu-eu' per definirne una sovrapposizione accurata. La misurazione 'g-op' costituisce la lunghezza massima del cranio attraverso la distanza intercorrente in linea retta dalla glabella all'opistocranion; il punto di repere 'g' è situato sulla bozza frontale media, al di sopra della sutura naso-frontale (pertanto il punto anteriore più sporgente tra le due arcate supraorbitarie), mentre il punto di repere 'op' è il più distante dalla glabella e individuabile sull'osso occipitale (piano sagittale mediano). La misurazione 'eu-eu' rappresenta, invece, la larghezza massima del cranio fra i due punti (euryon) più sporgenti lateralmente che si collocano sui parietali, superiormente, per alcuni mm, alla sutura squamosa. Analogamente si sono osservate anche le larghezze 'mf-ek' e 'h-orb'. Nel primo caso trattasi della larghezza orbitale determinata da una retta parallela al margine superiore dell'orbita che diparte dall'intersezione della sutura maxillo-frontale con il bordo mediale dell'orbita e termina sul bordo laterale della stessa; nel secondo caso si tratta dell'altezza orbitale, ossia la distanza massima verticale tra i bordi superiore ed inferiore dell'orbita. La comparazione dei due crani ha consentito di definire con precisione per il modello di La Ferrasse I una lunghezza 'g-op' pari a ca. 19 cm, una larghezza 'eu-eu' di ca. 15 cm, una larghezza 'mf-ek' di 4.5 cm e una altezza 'h-orb' di 3.5 cm. Per l'uomo di Altamura, attraverso la proiezione speculare rispetto alla sutura sagittale del parietale sinistro (incompleto) rispetto al parietale destro (completo) è possibile definire una larghezza 'eu-eu' pari a ca. 17 cm, una larghezza 'mf-ek' di 4.1 cm ca. e una altezza 'h-orb' di 3.5 cm, mentre risulta allo stato attuale non calcolabile con sicurezza la lunghezza 'g-op'. Si osservano, pertanto, misure nettamente similari per la parte orbitale, mentre una maggiore larghezza cranica per l'uomo di Altamura.

Conclusioni

La Grotta di Lamalunga, un sito carsico di rara bellezza e fragilità, richiede approcci innovativi per garantire una gestione sostenibile e non invasiva. In questo contesto, l'uso di tecnologie avanzate come la modellazione 3D, la realtà virtuale (VR) e l'archeologia virtuale diventa fondamentale non solo per la conservazione del sito, ma anche per la diffusione e l'analisi scientifica dei suoi reperti. L'adozione di tecniche digitali di rimozione delle concrezioni, come quella eseguita sul cranio dell'Uomo di Altamura, ha permesso di ottenere un modello accurato e altamente dettagliato, epurato dalle concrezioni calcitiche. Questo processo non solo ha ridefinito digitalmente il reperto, ma ha anche offerto un'opportunità unica di analizzare e comparare i dati con altri importanti ritrovamenti, come quelli dell'uomo di Neanderthal di La Ferrassie. Grazie all'archeologia virtuale, esperti possono esplorare e studiare questi reperti in modo non distruttivo, senza mettere a rischio la loro integrità fisica, ma mantenendo al contempo una conservazione digitale completa. Inoltre, il valore di questa rappresentazione digitale si estende ben oltre la semplice analisi scientifica. Grazie alla combinazione di modelli 3D e realtà virtuale, il sito della Grotta di Lamalunga diventa accessibile in modo virtuale a una vasta gamma di utenti: dai ricercatori agli studenti, fino al pubblico generale. L'utilizzo della realtà virtuale permette una fruizione immersiva e consapevole del sito, rendendo possibile l'esplorazione di ambienti che, per la loro delicatezza, sarebbero altrimenti inaccessibili. In questo modo, la virtualizzazione del patrimonio archeologico non solo preserva, ma promuove anche una fruizione globale e democratica, dove chiunque, da qualsiasi parte del mondo, può accedere ai dati e vivere un'esperienza interattiva. Il confronto tra i modelli digitali degli elementi antropologici e dell'intero contesto, inoltre, apre nuove prospettive in termini di comparazione e analisi predittiva, fornendo strumenti utili per affinare le metodologie di studio del Neanderthal e di altri reperti. Infine, l'approccio integrato tra archeologia tradizionale, archeologia virtuale e web-VR consente non solo di acquisire e archiviare i dati in formato digitale, ma anche di condividerli in tempo reale con la comunità scientifica globale, migliorando la collaborazione internazionale e rendendo il patrimonio accessibile a un pubblico molto più ampio. Questo processo promuove una conservazione consapevole, che tiene conto non solo delle esigenze scientifiche e di studio, ma anche della necessità di trasmettere il patrimonio alle generazioni future attraverso nuove modalità interattive e facilmente fruibili in termini digitali.

Nota

[1] I lavori sono stati realizzati con il finanziamento del MiC nell'ambito delle perizie di spesa della Soprintendenza ABAP per la città metropolitana di Bari n. 6/2022 (RUP dott.ssa A. Montedoro, DL e progettista dott.ssa E. Dellù) e n. 1/2023 (RUP dott.ssa E. Dellù, progettisti dott.ssa E. Dellù e arch. M. Carcavallo, DL M. Carcavallo). Si ringraziano dirigenti e funzionari del MiC, gli studiosi e gli speleologi del CARS che nel corso degli anni hanno consentito di portare avanti la tutela e le ricerche sulla Grotta di Lamalunga.

Riferimenti bibliografici

- Banfi F. (2023). *Virtual Heritage: from 3D modelling to HBIM and extended reality*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore.
- Banfi, F., Dellù, E., Roncoroni, F., Cacudi, G. (2024). Beyond digitisation and high-res 3D modelling of complex archaeological sites: shaping virtual heritage, XR engagement and preservation of Neanderthal Man's remains and Lamalunga cave. In *Dise-gnareCon*, 17(32), pp. 1-20.
- 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). In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, pp. 171-181. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-171-2023.
- Branca M., Voltaggio M. (2010). Studi cronologici eseguiti sulle concrezioni carbonatiche della Grotta di Lamalunga. In *Dire in Puglia*. Ministero per i Beni e le Attività Culturali – Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Puglia, Città di Castello, pp. 55-60.
- Cacudi, G., Dellù, E., Banfi, F., Rinaldi, T., Quagliariello, A., Pepe, G., Sivilli, S., Tenore, A. (2024). La Grotta di Lamalunga (Altamura - BA). Dal reperto alla complessità del contesto attraverso nuovi approcci transdisciplinari. In *Restauro Archeologico*, Vol. 32, Issue 2, Part 2, p. 206.
- Caramelli D., Lari M., Rizzi E., Balsamo C., Gigli E., Corti G., Milani L., Vai S., Pilli E., DiVincenzo F., Piperno M., Manzi G., De Bellis G., Fox C. L., Barbujani G. (2010). Analisi paleogenetica del Neanderthal di Altamura. In *Dire in Puglia*. Ministero per i Beni e le Attività Culturali – Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Puglia, Città di Castello, pp. 45-54.
- DiVincenzo F., Lari M., Borsato A., Ghirotto S., Micheli M., Balsamo C., Collina C., De Bellis G., Frisia S., Giacobini G., Gigli E., Helstrom J. C., Lannino A., Modi A., Pietrelli A., Pilli E., Profico A., Ramirez O., Rizzi E., Vai S., Venturo D., Piperno M., Lalueza-Fox C., Barbujani G., Caramelli D., Manzi G. (2017). L'uomo di Altamura, vent'anni dopo: nuove ricerche sullo scheletro della grotta di Lamalunga (Altamura, Bari). In *Studi di Preistoria e Protostoria*, 4, pp. 181-190.
- Giacobini G., Tagliacozzo A., Manzi G. (2010). Lo scheletro umano e i reperti faunistici della Grotta di Lamalunga: considerazioni tafonomiche. In *Dire in Puglia*. Ministero per i Beni e le Attività Culturali – Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Puglia, Città di Castello, pp. 27-32.
- Lari M., Di Vincenzo F., Borsato A., Ghirotto S., Micheli M., Balsamo C., Collina C., De Bellis G., Frisia S., Giacobini G., Gigli E., Helstrom J. C., Lannino A., Modi A., Pietrelli A., Pilli E., Profico A., Ramirez O., Rizzi E., Vai S., Venturo D., Piperno M., Lalueza-Fox C., Barbujani G., Caramelli D., Manzi G. (2015). The Neanderthal in the karst: first dating, morphometric, and paleogenetic data on the fossil skeleton from Altamura (Italy). In *Journal of Human Evolution*, 82, pp. 88-94. DOI: 10.1016/j.jhevol.2015.02.007.
- Reilly P. (1991). Towards a virtual archaeology. In *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 1990, pp. 132-139.

Sitografia

- Smithsonian Institution. La Ferrassie I - *Homo neanderthalensis: cranium*. <https://www.si.edu/object/3d/homo-neanderthalensis-craniu-m:62c5a1ab-24bc-467d-8566-5e67be2fc41d>.
- Museo de Historia Natural. La Ferrassie I - *Homo neanderthalensis skull cast*. <https://sketchfab.com/3d-models/homo-neanderthalen-sis-skull-cast-a1ffe02b7e2f42ff972953484f3212d3>.

Autori

Fabrizio Banfi, Politecnico di Milano, fabrizio.banfi@polimi.it
Elena Dellù, Soprintendenza ABAP per la città metropolitana di Bari, Ministero della Cultura, elena.dellu@cultura.gov.it
Giovanna Cacudi, Soprintendenza ABAP per la città metropolitana di Bari, Ministero della Cultura, giovanna.cacudi@cultura.gov.it

Per citare questo capitolo: Fabrizio Banfi, Elena Dellù, Giovanna Cacudi. (2025). Archeologia virtuale per la ricostruzione dell'Uomo di Neanderthal e la conservazione della Grotta di Lamalunga In L. Carlevaris et al. (A cura di). *èkphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/èkphrasis. Descriptions in the space of representation*. Atti del 46° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Milano: FrancoAngeli, pp. 2255-2278. DOI: 10.3280/oa-1430-c872.

Virtual Archaeology for the Reconstruction of the Neanderthal Man and the Conservation of the Lamalunga Cave

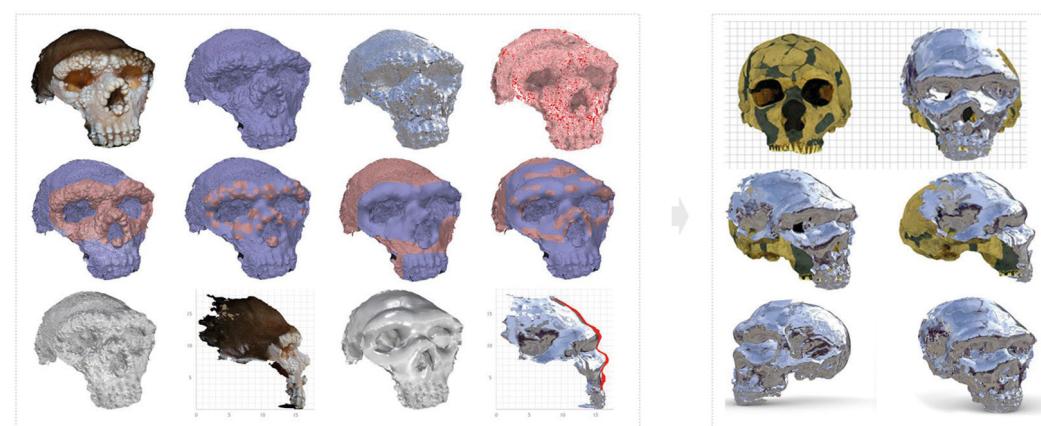
Fabrizio Banfi
Elena Dellù
Giovanni Cacudi

Abstract

In recent years, the use of advanced technologies, including digital surveying, three-dimensional modelling, and extended reality, has enabled the overcoming of physical and temporal barriers, offering innovative solutions for the analysis and remote access to archaeological sites and artefacts otherwise inaccessible to the general public. A significant example of this application is the study of the Neanderthal remains found in the Lamalunga Cave in Puglia, a site of considerable archaeological and paleoanthropological value, which is the focus of this research. Launched in 2022, the project promoted by the Soprintendenza ABAP for the Metropolitan City of Bari led to the creation of high-resolution digital twins of the remains, the cave, and the entire environmental context, fostering both virtual accessibility and the conservation of the site. The integration of virtual reality (VR) and web-XR technology facilitated the creation of new forms of knowledge and inclusivity. This study presents the latest results in these fields, positioning itself within a constantly evolving research sector, such as virtual archaeology. In particular, the development of an interactive virtual interface and a new VR application has supported anthropological analyses and the three-dimensional mapping of the bone remains from a conservation perspective, allowing the application of advanced virtual removal methodologies for calcitic deposits and laying the foundation for the original reconstruction of the skull.

Keywords

Virtual Archaeology, Neanderthal, interpretation, 3D Modelling, Virtual Reality (VR).



Virtual Archaeology: The Digital Reconstruction of the Neanderthal Skull (Altamura, Bari).

"Archaeology is not what you find, it's what you find out."
David Hurst Thomas

Introduction

The Science of Representation, in symbiosis with the evolution of digital surveying technologies, 3D modelling, and extended reality (XR), has opened exciting prospects for addressing new challenges in the field of virtual archaeology. This synergistic encounter between science and innovation has led to increasingly sophisticated analytical methodologies, offering a deep understanding of the studied phenomena and revealing ontological and diachronic dynamics of cultural heritage. In this context, fundamental principles such as sustainability, accessibility, communication, and inclusion have emerged as indispensable pillars, stimulating new lines of research. In this evolution, virtual archaeology emerges as a point of convergence between cultural heritage and modern digital technologies, generating kaleidoscopic experiences of interaction and reflection. The term 'virtual archaeology', coined by Paul Reilly in 1990, initially referred to the use of 3D models for representing monuments, archaeological sites, and artefacts [Reilly 1991, pp.132-139].

Over time, the concept of the 'virtual' has expanded to include a multitude of representations accessible through advanced technologies. Thanks to digital surveying, 3D modelling, augmented reality (AR), and virtual reality (VR), it is now possible to create interactive and immersive reconstructions of archaeological sites and artefacts. These simulations, sometimes even achievable in real time, allow for the visual and sensory exploration of places and remains that would otherwise be inaccessible, damaged, or destroyed, opening new frontiers in heritage conservation [Banfi 2023]. In this context, technology becomes an interpreter of the relationship between the past and the present, acting as a hermeneutic syllogism capable of mediating the temporal and spatial bond between different epochs. It enables, when properly directed, the understanding of the value of each artefact in a diachronic context, revealing the mutable and fractal nature of historical processes that converge within them. An emblematic example of this application is the study of the remains of the Neanderthal Man and the Lamalunga Cave in Puglia (fig. 1). Known for the presence of a *Homo neanderthalensis* dating back to $172 \pm 15 - 130.1 \pm 1.9$ thousand years ago (U-Th), the cave is only accessible to professionals and researchers to ensure the protection of the site.

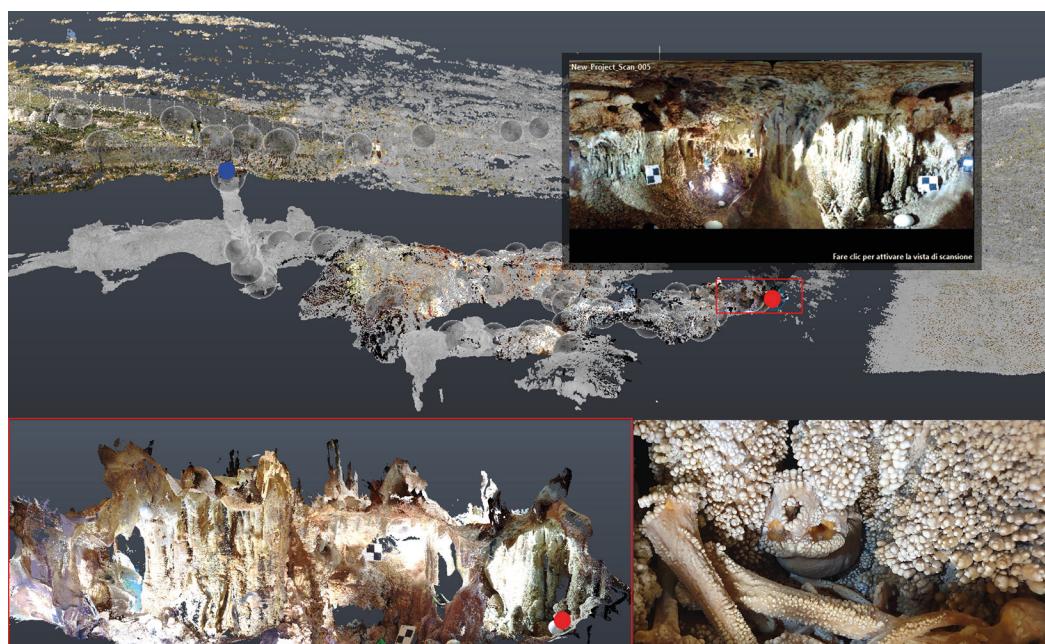


Fig. 1. The apse of the Neanderthal Man. In red: his skeletal remains; in blue: the entrance to the Lamalunga cave. Laser scanning survey data from the 2022 campaign.

Since 2022, the ABAP Superintendency of Bari has led an innovative, transdisciplinary research project aimed at enhancing conservation through the application of a 'global' knowledge methodology. This approach involves the integration of all disciplines useful for a diachronic understanding of the natural and historical-cultural events that have affected the cave's territorial context, alongside technical-instrumental and microbiological methods to assess potential forms of biodegradation (coordinated by architect G. Cacudi, scientific direction by anthropologist E. Dellù) [1]. The *Gicarus-ABCLab* of the Politecnico di Milano (directed by Prof. F. Banfi) specifically oversaw the survey and digital data acquisition, with operational support from the Altamura Speleological Research Centre (CARS). Topographic, laser scanning, and photogrammetric surveys led to the creation of ultra-detailed digital models capable of meeting virtual accessibility requirements while simultaneously enabling scientific analysis without compromising the integrity of the site [Cacudi et al. 2024, p.206]. A central aspect of the studies carried out thus far has been the use of digital models and their integration with VR and web-XR technologies. These tools have supported site analysis, the safeguarding of its invaluable remains, and inclusive communication strategies aimed at enabling broader, more interactive engagement with the heritage –by both experts and scholars as well as virtual tourists [Banfi et al. 2023, pp.171-181; Banfi et al. 2024]. Over the past year, the research has focused on the development of an interactive virtual environment, specifically designed to meet the needs of anthropologists and archaeologists. This environment supports the study of the original morphological characteristics of the Neanderthal remains (fig. 2), the taphonomic and diagenetic processes that have occurred from the time of the individual's decomposition to the present, the geological stratifications formed over millennia, and medium- to long-term monitoring of the conservation conditions of the entire karst context.

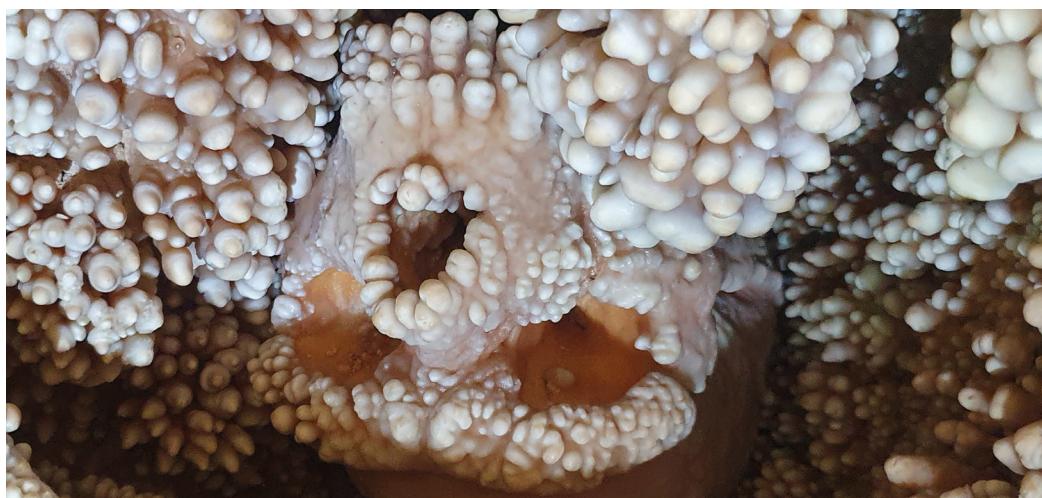


Fig. 2. The Neanderthal skull and the details of the sediments.

This study, therefore, positions itself within a still partially unexplored field, with the aim of providing innovative digital methods and tools capable of addressing emerging challenges in the conservation and enhancement of cultural heritage, particularly in the fields of archaeology and anthropology. Through the Science of Representation, the research has applied advanced technologies to meet contemporary challenges related to the protection of the Neanderthal remains within the broader karst context, promoting new modes of interactive analysis, virtual accessibility, inclusion, and sustainability. A central aspect of this approach has been the detailed study of the Neanderthal skull, used as a key element in experimental digital analysis, which will be followed by further developments involving additional remains.

Advanced Methodologies for the 3D Reconstruction of Neanderthal Remains

From a methodological perspective, the survey and digitisation phase undertaken in 2023 involved the creation of ultra-high-resolution textured photogrammetric mesh models, capable of capturing all surface morphological features of the remains. The primary objective was to achieve high levels of detail and information, by decomposing the models into sub-elements representing manipulable, semantically-textured entities within a virtual environment. The adopted approach aimed to overcome the limitations of standard automated digital tools typically used in digital photogrammetry applications, which—while simplifying the conversion of spatial points into mesh—lack flexibility in generating sub-elements relevant to data analysis and interpretation. The use of reverse engineering software, *Geomagic Design X*, enabled the correction of common mesh errors and the application of tools such as 'MeshToNURB'. The process included the correction of topological errors, such as self-intersections and redundant geometries, and the creation of watertight models, ready for further manipulation. This transformation of mesh surfaces into NURBS models reduced computational load and optimised volumetric modelling efficiency, ensuring an accurate representation of the most complex details. To achieve the best modelling outcomes, various retopology software tools were tested and employed, including *ZBrush*, *3D-Coat*, *InstantMeshes*, *Rhinoceros*, and *Blender*. The latter, with its 'Remesh' and 'RetopoFlow' tools, facilitated the creation of new topologies, enhancing the modelling of the bones themselves. A significant aspect was the integration of 3D design techniques based on Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) algorithms, which bridged the generative gap without compromising the analytical, interpretative, and precision manipulation phases of the data. For the virtual reconstruction of the Neanderthal bone remains—particularly regarding the removal of limestone concretions formed over millennia—3D design proved to be a crucial step (fig. 3). Literature highlights that the physical nature of point clouds and mesh models does not allow for direct transformation into semantic objects, making human intervention essential in the interpretation of data and in identifying discontinuities between the analysed bones. The methodological approach adopted, which combined 3D design and NURBS modelling, enabled effective management of the two main geometric entities: the skeletal remains and the calcitic irregularities covering them. Before removing the concretions, a rigorous verification of methodological precision was carried out. This process established an approach capable of supporting 3D design performed directly on the remains, avoiding modelling errors or misinterpretations in mapping the stratigraphic units identified throughout the analysis. Thanks to NURBS interpolation tools and 3D design features in software such as *Rhinoceros* and *Blender*, it was possible to decompose the model into 3D stratigraphic units (US), which could be updated and edited by drawing directly onto the three-dimensional reconstructions. The interpretation, drawing, and mapping process also led to the creation of discrete geometric elements for the various stratigraphic units, which could be easily removed using operations such as smoothing, cutting, subtraction, and surface homogenisation. Finally, an automated verification system calculated the geometric accuracy of the models by measuring the standard deviation between the initial and final models, thereby validating the reconstructed bone morphology.

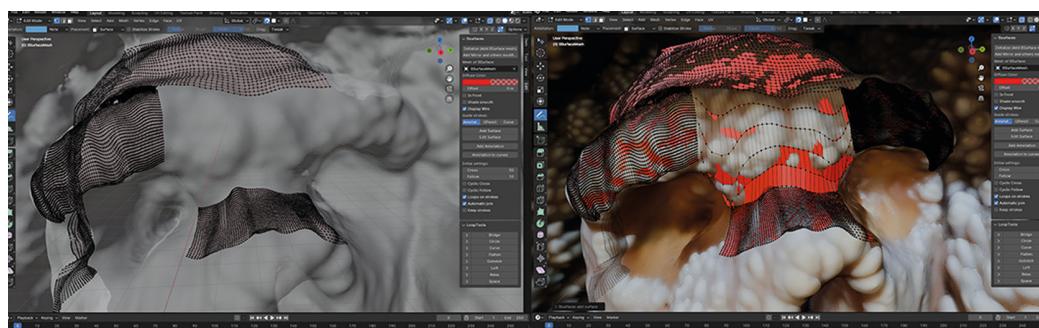


Fig. 3. The NURBS model involved an initial phase of conversion from mesh to NURBS surfaces in *Geomagic Design X*, followed by 3D modeling of microareas in *Blender*. Through analysis, interpretation, and 3D drawing directly on the NURBS model of the skull, it was possible to proceed with the progressive removal of sediments.

By employing advanced 3D modelling techniques and VR-AR applications, along with the interpolation of 3D survey data points using NURBS algorithms, 3D design, retopology, and ultra-high-resolution mesh models, this process enabled the gradual reconstruction of the original morphology of the skull, free from calcitic concretions. The result is a more precise, analytical, and detailed visualisation of a specimen of inestimable cultural and biological value.

The Lamalunga Cave and its Artifacts

The analysis of the Altamura Man offers a rare opportunity to explore aspects of human evolution that would otherwise remain unknown. This extraordinary fossil is encased within karstic concretions that have enveloped and preserved it over millennia. The Lamalunga Cave, located on the Murge plateau less than 500 metres above sea level, northeast of Altamura (40°49'N, 16°33'E), forms the upper section of a large karst system comprising two main branches. Inside the cave, one finds stalactites, stalagmites, flowstones, and 'coraloid' formations [Cacudi *et al.* 2024, p.206], the latter representing the final stage of calcite precipitation, linked to deposition phenomena caused by evaporation. The karst complex develops primarily along two sub-horizontal galleries situated close to the surface, which converge in a central chamber almost entirely filled by a detrital cone (fig. 4). The galleries are interrupted by vertical shafts, some of which once opened to the exterior but have since collapsed or become filled in. In the so-called 'Apse of the Man' lie numerous palaeoanthropological remains belonging to a single *Homo neanderthalensis*, exceptionally well preserved and extensively coated in coraloid calcite formations –deposition processes which, in some areas, have incorporated the bones into the karst formation itself. From a taphonomic perspective, analysis of anatomical connections suggests that the individual lay in a flexed position. Following the decomposition of soft tissues, gravity likely caused the skeletal elements to fall to the cave floor. Numerous faunal remains have also accumulated on the surface, particularly in association with a major collapse event dated between 45,000 and 30,000 years ago (U-Th), which led to the presence of calcite-encrusted bones lying on a flat floor or submerged in stagnant water. These remains are coated with thin layers, embedded

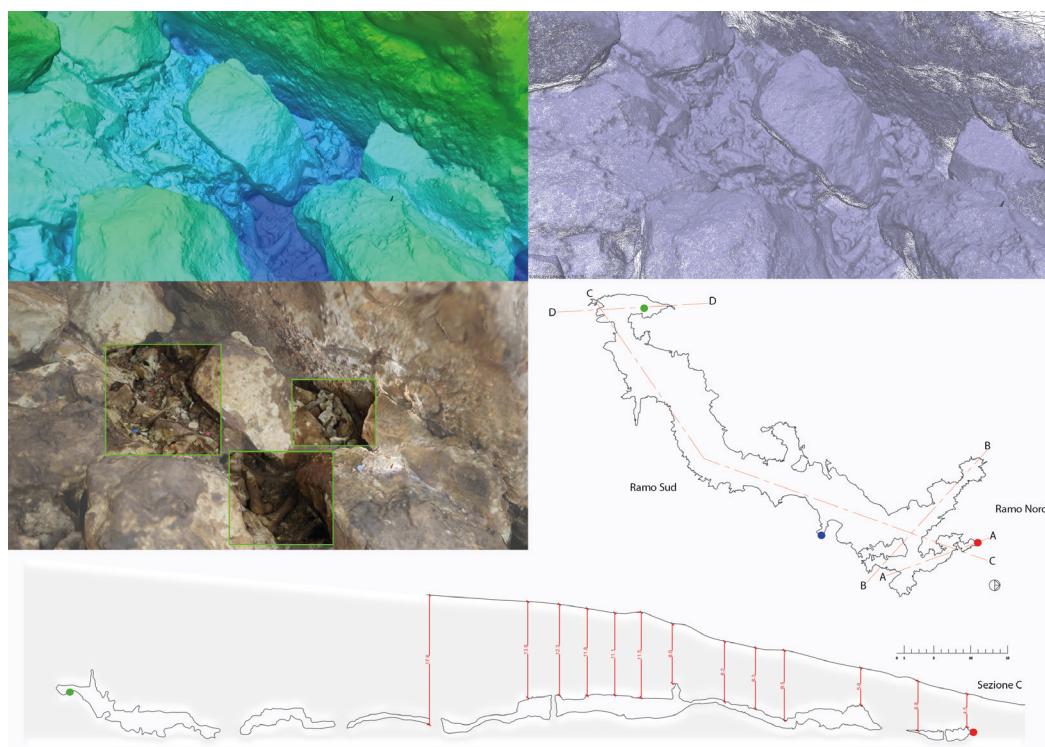


Fig. 4. In green: the new faunal remains documented inside the cave during the surveying and digitization operations of 2023 in the South branch.

branch. The digitization process allowed for the extension of the cave documentation and the integration of the survey data and results from the previous 2022 survey campaign of the North branch. In red: the remains of the Neanderthal Man

in or partially adhered to stalagmites, and covered with globular, coralloid inflorescences. Chronological studies conducted on the calcitic formations associated with these palaeontological remains (U-Th dating) have dated the deposition phase to between 45,000 and 30,000 years ago.

More recently, current climate change has made it necessary to implement new medium- and long-term monitoring strategies and remote investigations of the entire territorial context to assess potential biodegradation affecting this exceptional cultural heritage. At the same time, it became essential to broaden the scope of research, adopting a 'global' approach that includes not only the Neanderthal individual but also the cave and its external geological environment.

For the first time in the history of research on the site, the survey and digitisation campaigns carried out in 2022 and 2023 made it possible to document numerous remains in both the northern and southern branches of the cave, using various types of sensors and advanced digitisation and XR techniques [Banfi et al. 2023, pp.171-181; Banfi et al. 2024] (figs. 5, 6).



Fig. 5. Shots taken with a flexible endoscope for the integration of photogrammetric and laser scanning data for the reconstruction of the exocranial cavities of the Altamura Man.

The skull and the main skeletal remains of the Neanderthal man

Following the discovery of the palaeoanthropological and faunal context in 1993 by a group of speleologists, the Lamalunga Cave has been the subject of multidisciplinary investigations, primarily aimed at understanding the deposit through the study of the remains (quantification, taxonomy, chronological frameworks, palaeoclimatic indications), their topographic mapping, and surveys using the methodologies available at the time. The skeletal remains of *Homo neanderthalensis* are located at the north-eastern end of the cave and are spatially dispersed. The skull is prominently positioned, overturned and frontal, with numerous bones at its base, including the mandible, right radius, ulna (indeterminate), both pelvic bones, femora, tibiae, and fibula (indeterminate). Behind the skull, in a secondary chamber to the north known as the 'retro-apse,' the right humerus and right scapula are present –the latter removed in 2009 for genetic analysis. Thanks to research carried out over the past 15 years— including morphological, morphometric, and palaeogenetic investigations –the fossil has been identified as a rare example of an adult Neanderthal, exhibiting a combination of derived traits (typical of *Homo neanderthalensis*) and plesiomorphic traits (shared with *Homo heidelbergensis*). Its chronological placement lies between the Middle and Upper Pleistocene, more precisely between 172 ± 15 and 130.1 ± 1.9 thousand years ago [Caramelli et

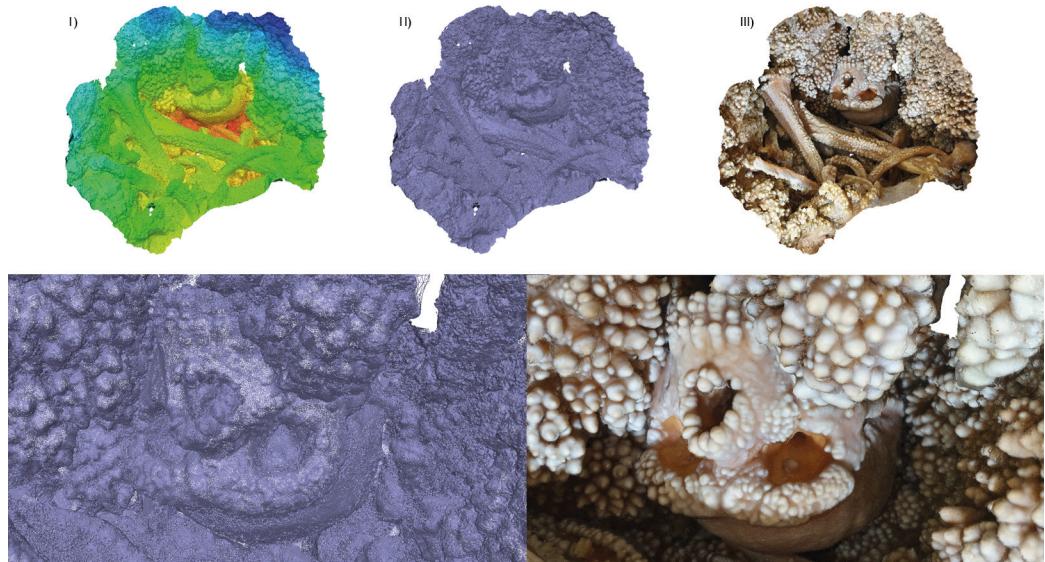
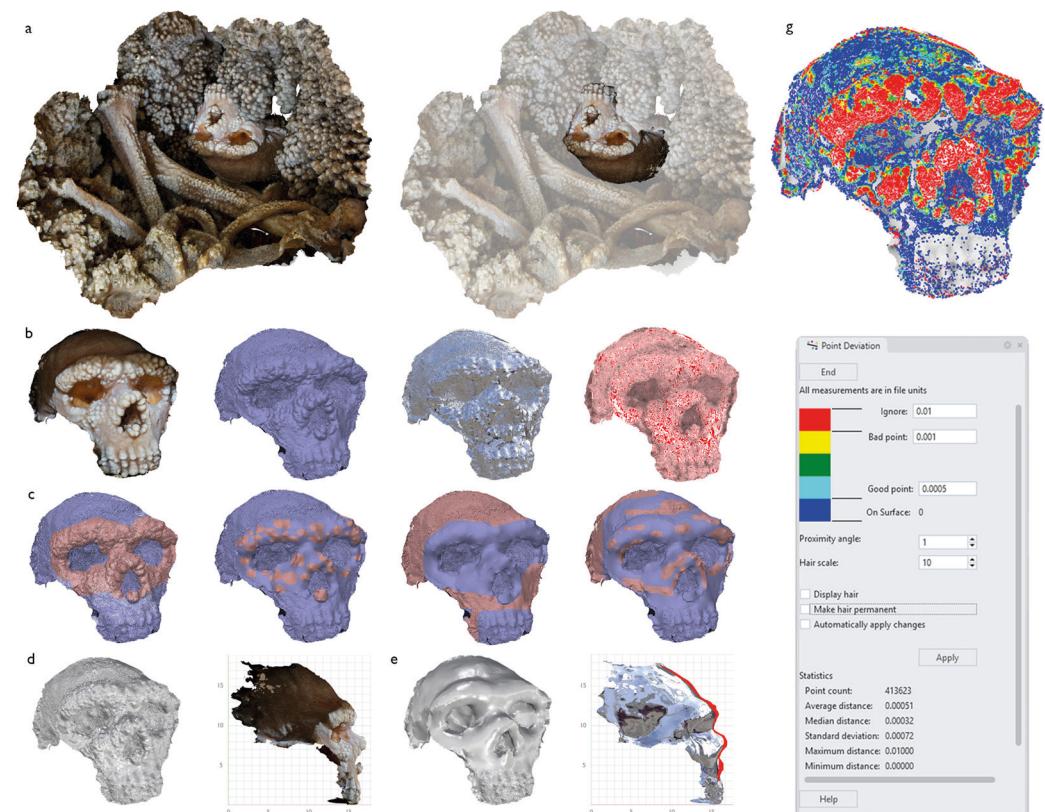


Fig. 6. Photogrammetric outputs of the Neanderthal remains:
 1. point cloud
 2. mesh model
 3. textured mesh model.



al. 2010, pp. 45-54; Lari et al. 2015, pp. 88-94; Di Vincenzo et al. 2017, pp. 181-190]. From a taphonomic perspective, the condition of the human remains differs from that of the faunal remains. There is a high percentage of preservation within a confined area of the cave. Although no firm anatomical connections are currently visible, loose associations suggest the individual may have been in a flexed position. Upon decomposition of the soft tissues, gravity likely caused the skeletal elements to fall to the cave floor, disrupting any articulations [Giacobini et al. 2010, pp. 27-32; Cacudi et al. 2024, p.206]. At present, the natural skeletal morphology of the bones cannot be directly observed due

to their coverage by calcitic deposits of varied types, textures, and thicknesses [Branca, Voltaggio, 2010, pp. 55-60; Vanghi *et al.* 2010]. The skull, in particular, shows prominent coraloid deposits concentrated on the projecting parts of the splanchnocranum (facial skeleton), such as the supraorbital margins, brow ridges, frontal process, alveolar process, and naso-alveolar clivus.

The upper portion of the frontal bone and the parietals display less prominent but more uniformly distributed deposits. A similar pattern is observed on the postcranial bones, where the calcitic concretions appear coraloid on the more exposed, prominent areas (e.g. crests, ridges, processes, tuberosities), and more homogenous on linear surfaces. Due to the presence of these calcite formations, the actual bone morphology of various skeletal regions cannot currently be assessed for conservation purposes.

However, the digital experimentation presented in this study enables virtual stratigraphic removal of the sedimentary deposits accumulated over millennia (fig. 7). As such, the development of an intuitive yet immersive tool capable of precisely supporting the 3D mapping of key stratigraphic units proves fundamental to laying the groundwork for a virtual reconstruction of the Neanderthal individual. This approach not only enables accurate representation of the environment and remains, but also provides an opportunity to dynamically and interactively explore the past, offering deeper insight into the taphonomic and diagenetic processes that affected the remains.

On a broader scale –by extending this process to significant portions of the karst context– it allows for archaeological analysis and an enhanced understanding of human–environment interaction. The ability to combine three-dimensional data with interactive simulations marks a crucial step forward in the study of human evolution and the occupation phases of the cave, which are still under investigation. It opens new perspectives for archaeological research and heritage interpretation.

The VR app for the analysis of the Neanderthal skeletal remains

The value of the VR applications developed in this context is primarily evident in terms of accessibility and ease of use. Unlike traditional approaches, which required complex software or 3D modelling platforms, the new Interactive Virtual Environment (IVE) has been designed to minimise technological barriers and allow immediate access for all users, without the need for specialised skills or advanced hardware. The implementation of two modes of access –Web-VR and a local VR App– represents a significant step forward in terms of versatility and compatibility.

The Web-VR application allows direct access via a simple browser and QR code, requiring no additional installation. This makes it particularly suitable for users needing quick and simplified access through common devices such as smartphones, tablets, laptops or desktops, independent of the operating system. Content is automatically updated, simplifying maintenance, although performance –while optimal– is dependent on internet connection quality and browser capabilities.

On the other hand, the locally installed VR App was developed to deliver higher performance and a more immersive experience, fully leveraging the hardware resources of the device and optimising interaction with advanced VR headsets such as the Meta Quest 3. Enhanced graphical quality and operating system-specific optimisation allow for detailed visualisation and smooth navigation within the IVE, including advanced operations such as the analysis of skeletal remains or comparisons with archaeological finds.

Furthermore, this technological optimisation has enabled advanced analysis of bone concretions, thanks to high-definition 3D models that can be explored in VR and also via projection systems to engage broader audiences (figs. 8, 9).

The VR visualisation modes, which include various rendering and analytical options, make both developed solutions not only accessible tools, but also highly powerful instruments for morphological and anthropometric research.



Fig. 8. The development of an interactive virtual environment has enabled different modes of interaction and immersion. Above: the VR app that provides an immersive experience via VR headset, desktop PC, and laptop; below: the web-VR application. By uploading the IVE to the cloud, it is possible to access it through any web browser and interact with mobile devices such as smartphones and tablets.

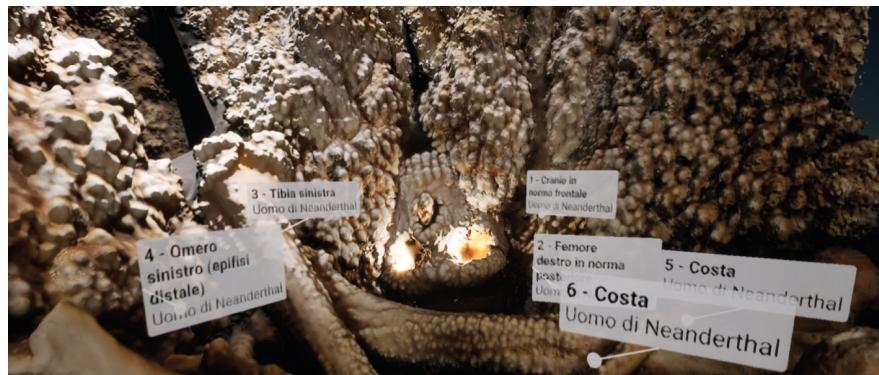
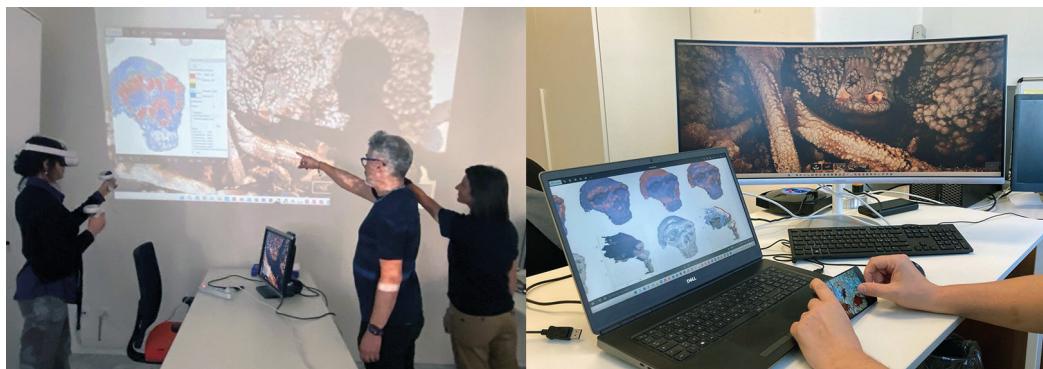


Fig. 9. The virtual exploration of the digital reconstruction of the Neanderthal man's skull. Through the integration of video projectors and next-generation devices, both developed applications (appVR and web-VR) can be shared by multiple users simultaneously, thus allowing access to a wider audience.



Comparison between the Neanderthal Skull of La Ferrassie I and the Altamura Man Skull

Dating back to between 70,000 and 50,000 years ago, 'La Ferrassie I' is considered by many scientists to be the 'classic' example of Neanderthal anatomy, exhibiting many typical Neanderthal features, such as the low and sloping forehead and the large nasal aperture (fig. 10). With a cranial capacity of 1641 cm³, it is the second largest hominid skull ever discovered, after Amud I. The individual, at the time of death, was approximately 45 years old, a notably advanced age for such an ancient hominid. Thanks to the online application 'Homo neanderthalensis: cranium' from the National Museum of Natural History published on the Smithsonian Institute website (the world's largest museum, education, and research complex) and the downloadable 3D model from the [UV] Museo de Historia Natural in Valencia, it was possible to explore the digitized remains of 'La Ferrassie I' and compare them with the results of this study. The skull of the Altamura Man is not currently fully observable due to the calcitic encrustations present, which prevent a complete lateral-postero view. For this reason, the skulls of the two individuals were superimposed to compare their morphologies and metrics using observable reference points on both. The longitudinal 'g-op' alignment and the transverse 'eu-eu' alignment

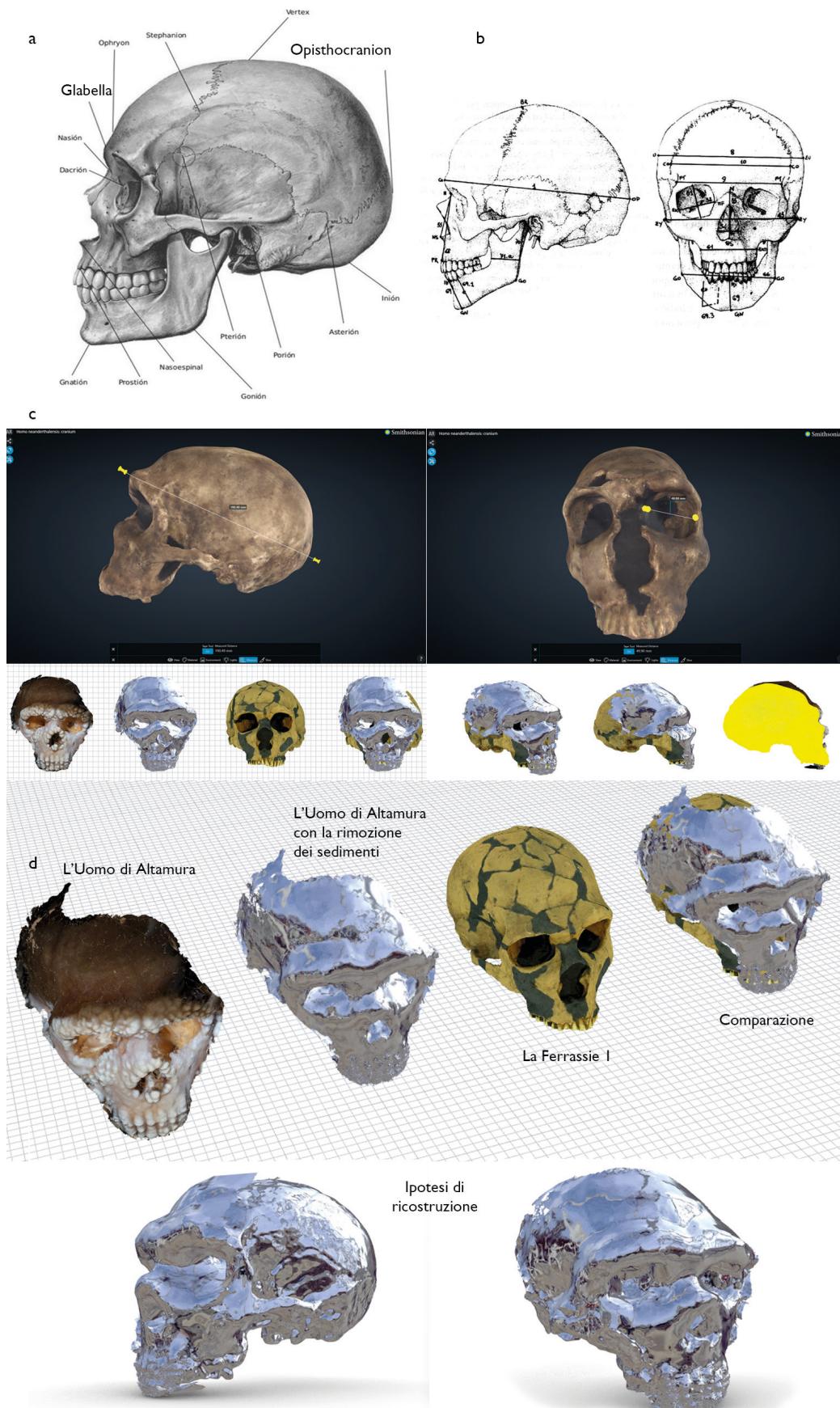


Fig. 10. a. graphical representation of craniometric points. b. identification of the maximum cranial length, i.e., the straight-line distance from the glabella (located on the middle frontal boss, above the naso-frontal suture – G) to the opistocranion (the most anterior protruding point between the two supraorbital arcs – OP). c. La Ferrassie I – *Homo neanderthalensis*: cranium National Museum of Natural History – The Smithsonian Institution, with the identification of the 'g-op' distance of 19 cm. d. from left to right: the model of the Man of Altamura, the model without sediments, the model of La Ferrassie I (Source: Museo [UV] Historia Natural Valencia), and the comparison between the last two. e. the reconstruction hypothesis of the Man of Altamura, which involved merging the model of the Man of Altamura and the model of La Ferrassie I (Source: Museo [UV] Historia Natural).

were employed to define an accurate overlap. The 'g-op' measurement represents the maximum skull length, defined as the straight-line distance from the glabella to the opistocranion. The reference point 'g' is located on the central frontal protuberance, above the naso-frontal suture (thus, the most anteriorly protruding point between the two supraorbital arches), while the reference point 'op' is the farthest from the glabella and is identifiable on the occipital bone (median sagittal plane). The 'eu-eu' measurement, on the other hand, represents the maximum width of the skull between the two most laterally protruding points (euryon), located on the parietals, slightly superior to the squamous suture by a few millimeters. Similarly, the 'mf-ek' and 'h-orb' widths were also measured. The first refers to orbital width, determined by a straight line parallel to the upper margin of the orbit, extending from the intersection of the maxillo-frontal suture with the medial edge of the orbit, ending on its lateral edge.

The second refers to orbital height, which is the maximum vertical distance between the upper and lower edges of the orbit. Comparing the two skulls allowed for the precise determination of the following measurements for the La Ferrassie I model: a 'g-op' length of approximately 19 cm, an 'eu-eu' width of about 15 cm, an 'mf-ek' width of 4.5 cm, and an 'h-orb' height of 3.5 cm. For the Altamura Man, through a mirror projection relative to the sagittal suture of the left (incomplete) parietal to the right (complete) parietal, an 'eu-eu' width of about 17 cm, an 'mf-ek' width of about 4.1 cm, and an 'h-orb' height of 3.5 cm were determined, while the 'g-op' length is currently indeterminable with certainty. Notably, similar measurements were observed for the orbital region.

Conclusion

The Lamalunga Cave, a karst site of rare beauty and fragility, requires innovative approaches to ensure sustainable and non-invasive management. In this context, the use of advanced technologies such as 3D modeling, virtual reality (VR), and virtual archaeology becomes essential not only for the conservation of the site but also for the dissemination and scientific analysis of its findings. The adoption of digital techniques for the removal of encrustations, such as the one performed on the skull of the Altamura Man, has allowed for the creation of an accurate and highly detailed model, free from the calcitic encrustations. This process not only digitally redefined the artifact but also offered a unique opportunity to analyze and compare the data with other important discoveries, such as the Neanderthal remains from La Ferrassie. Thanks to virtual archaeology, experts can explore and study these artifacts in a non-destructive manner, without risking their physical integrity, while maintaining a completed digital preservation. Furthermore, the value of this digital representation extends far beyond mere scientific analysis. Through the combination of 3D models and virtual reality, the Lamalunga Cave site becomes virtually accessible to a wide range of users: from researchers and students to the general public. The use of virtual reality enables an immersive and informed experience of the site, making it possible to explore environments that would otherwise be inaccessible due to their delicacy. In this way, the virtualization of archaeological heritage not only preserves but also promotes global and democratic accessibility, allowing anyone, anywhere in the world, to access the data and engage in an interactive experience. The comparison between the digital models of the anthropological elements and the entire context also opens new perspectives in terms of comparison and predictive analysis, providing useful tools to refine the study methodologies of Neanderthals and other artifacts. Finally, the integrated approach combining traditional archaeology, virtual archaeology, and web-VR allows not only for the acquisition and digital storage of data but also for sharing it in real time with the global scientific community, enhancing international collaboration and making the heritage accessible to a much broader audience. This process promotes conscious conservation, taking into account not only scientific and study needs but also the necessity of transmitting the heritage to future generations through new, interactive, and easily accessible digital modalities.

Notes

[1] The research was carried out with funding from the MiC as part of the expenditure reports of the ABAP Superintendency for the metropolitan city of Bari no. 6/2022 (RUP Dr. A. Montedoro, DL and designer Dr. E. Dellù) and no. 1/2023 (RUP Dr. E. Dellù, designers Dr. E. Dellù and architect M. Carcavallo, DL M. Carcavallo). We would like to thank the managers and officials of the MiC, the scholars and speleologists of CARS who, over the years, have made it possible to continue the protection and research of the Lamalunga Cave.

Reference List

- Banfi F. (2023). *Virtual Heritage: from 3D modelling to HBIM and extended reality*. Santarcangelo di Romagna: Maggioli Editore.
- Banfi, F., Dellù, E., Roncoroni, F., Cacudi, G. (2024). Beyond digitisation and high-res 3D modelling of complex archaeological sites: shaping virtual heritage, XR engagement and preservation of Neanderthal Man's remains and Lamalunga cave. In *DigneCon*, 17(32), pp. 1-20.
- 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). In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, pp. 171-181. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-M-2-2023-171-2023.
- Branca M., Voltaggio M. (2010). Studi cronologici eseguiti sulle concrezioni carbonatiche della Grotta di Lamalunga. In *Dire in Puglia*. Ministero per i Beni e le Attività Culturali – Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Puglia, Città di Castello, pp. 55-60.
- Cacudi, G., Dellù, E., Banfi, F., Rinaldi, T., Quagliariello, A., Pepe, G., Sivilli, S., Tenore, A. (2024). La Grotta di Lamalunga (Altamura - BA). Dal reperto alla complessità del contesto attraverso nuovi approcci transdisciplinari. In *Restauro Archeologico*, Vol. 32, Issue 2, Part 2, p. 206.
- Caramelli D., Lari M., Rizzi E., Balsamo C., Gigli E., Corti G., Milani L., Vai S., Pilli E., Di Vincenzo F., Piperno M., Manzi G., De Bellis G., Fox C. L., Barbujani G. (2010). Analisi paleogenetica del Neanderthal di Altamura. In *Dire in Puglia*. Ministero per i Beni e le Attività Culturali – Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Puglia, Città di Castello, pp. 45-54.
- Di Vincenzo F., Lari M., Borsato A., Ghirotto S., Micheli M., Balsamo C., Collina C., De Bellis G., Frisia S., Giacobini G., Gigli E., Helstrom J. C., Lannino A., Modi A., Pietrelli A., Pilli E., Profico A., Ramirez O., Rizzi E., Vai S., Venturo D., Piperno M., Lalueza-Fox C., Barbujani G., Caramelli D., Manzi G. (2017). L'uomo di Altamura, vent'anni dopo: nuove ricerche sullo scheletro della grotta di Lamalunga (Altamura, Bari). In *Studi di Preistoria e Protostoria*, 4, pp. 181-190.
- Giacobini G., Tagliacozzo A., Manzi G. (2010). Lo scheletro umano e i reperti faunistici della Grotta di Lamalunga: considerazioni tafonomiche. In *Dire in Puglia*. Ministero per i Beni e le Attività Culturali – Direzione Regionale per i Beni Culturali e Paesaggistici della Puglia, Città di Castello, pp. 27-32.
- Lari M., Di Vincenzo F., Borsato A., Ghirotto S., Micheli M., Balsamo C., Collina C., De Bellis G., Frisia S., Giacobini G., Gigli E., Helstrom J. C., Lannino A., Modi A., Pietrelli A., Pilli E., Profico A., Ramirez O., Rizzi E., Vai S., Venturo D., Piperno M., Lalueza-Fox C., Barbujani G., Caramelli D., Manzi G. (2015). The Neanderthal in the karst: first dating, morphometric, and paleogenetic data on the fossil skeleton from Altamura (Italy). In *Journal of Human Evolution*, 82, pp. 88-94. DOI: 10.1016/j.jhevol.2015.02.007.
- Reilly P. (1991). Towards a virtual archaeology. In *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*, 1990, pp. 132-139.

Sitography

- Smithsonian Institution. La Ferrassie I - *Homo neanderthalensis*: cranium. <https://www.si.edu/object/3d/homo-neanderthalensis-cranium:62c5ab-24bc-467d-8566-5e67be2fc41d>.
- Museo de Historia Natural. La Ferrassie I - *Homo neanderthalensis* skull cast. <https://sketchfab.com/3d-models/homo-neanderthalensis-skull-cast-a1ffe02b7e2f42ff972953484f3212d3>.

Authors

Fabrizio Banfi, Politecnico di Milano, fabrizio.banfi@polimi.it
Elena Dellù, Soprintendenza ABAP per la città metropolitana di Bari, Ministero della Cultura, elena.dellu@cultura.gov.it
Giovanna Cacudi, Soprintendenza ABAP per la città metropolitana di Bari, Ministero della Cultura, giovanna.cacudi@cultura.gov.it

To cite this chapter: Fabrizio Banfi, Elena Dellù, Giovanna Cacudi. (2025). Virtual Archaeology for the Reconstruction of the Neanderthal Man and the Conservation of the Lamalunga Cave. In L. Carlevaris et al. (Eds.), *ékphrasis. Descrizioni nello spazio della rappresentazione/ékphrasis. Descriptions in the space of representation*. Proceedings of the 46th International Conference of Representation Disciplines Teachers. Milano: FrancoAngeli, pp. 2255-2278. DOI: 10.3280/oa-1430-c872.