

Complesso nuragico di Palmavera ad Alghero. Rilievo e ricostruzione digitale

Enrico Cicalò^a, Michele Valentino^b, Alexandra Fusinetti^c, Andrea Sias^d, Dario Simula^e, Nicola Corgiolu^f

^{a-b-c-d-e-f} University of Sassari - Department Architecture, Design and Urban planning, Alghero, Italy, ^a enrico.cicalo@uniss.it, ^b mvalentino@uniss.it, ^c amfusinetti@uniss.it, ^d a.sias19@phd.uniss.it, ^e d.simula2@studenti.uniss.it, ^f n.corgiolu@studenti.uniss.it

Abstract

The form and architectural characteristics of the nuraghi and the surrounding walls have been decisive in the studies that initially focused on defensive and fortification aspects. From this, theories on Sardinia's social and economic organization in protohistory developed.

However, considering nuraghi only as defensive structures limits the understanding of their complexity. By abandoning a strictly militaristic view and adopting a broader perspective of the term 'fortress', their polyvalent function and significance, beyond mere military defence, becomes apparent.

In this context, the nuragic complex of Palmavera in Alghero is reinterpreted as an emblematic example of a complex nuraghe, composed of three towers and surrounded by a second concentric wall, known as a structured 'antemurale'. Contrary to the typical linear masonry, the 'antemurale' of Palmavera has a pentagonal shape with towers arranged at its vertices, among which the striking Capanna delle Riunioni. This study proposes a methodology for the documentation and digitalization of the site, divided into two main phases. The first phase is a detailed photogrammetric survey, capable of recording the morphological and dimensional characteristics of the complex. The second phase is based on advanced three-dimensional modelling, which will make it possible not only to represent the site's current state but also to visualize reconstructive hypotheses based on archaeological theories to explore the original configurations of the nuraghe.

Keywords: survey, digital reconstruction, archaeology, nuragic village of Palmavera.

1. Introduzione

Nell'ambito della ricerca condotta dal laboratorio GRA·VIS LAB (Laboratorio di Scienze Grafiche e Visive) del Dipartimento di Architettura, Design e Urbanistica dell'Università degli Studi di Sassari, parallelamente al processo di candidatura dei "Monumenti della civiltà Nuragica" alla *World Heritage List* del patrimonio universale dell'UNESCO, sono stati rilevati undici siti archeologici della civiltà nuragica (1) appartenenti a diverse tipologie di bene – dai pozzi sacri ai villaggi, dalle tombe dei giganti alle fortezze – al fine di documentare le

condizioni di conservazione e proporre strategie di implementazione per la fruizione, compresa quella virtuale, dei diversi beni dislocati sul territorio sardo. Di questi undici siti, quattro – il Nuraghe Appiu a Villanova Monteleone, il Nuraghe Orolo a Bortigali, il Nuraghe Ponte a Dualchi e il Villaggio nuragico di Palmavera ad Alghero – mostrano caratteristiche che li riconducono al concetto di fortificazione.

Lo studio dei nuraghi è stato un tema centrale sin dalle origini dell'archeologia sarda. Nonostante l'evoluzione delle prospettive, da visioni



Fig. 1- a. Vista nadirale da drone del complesso nuragico di Palmavera; b. le tre torri con bastione; antemurale pentagonale con muri interni; d. torri e capanna delle riunioni.

puramente militaristiche a interpretazioni più sfumate e polisemiche, è innegabile che i nuraghi siano caratterizzati da formidabili strutture murarie in pietra. La forma e le caratteristiche architettoniche dei nuraghi, insieme alla loro associazione con le opere di cinta e le relative mura, sono stati elementi fondanti di studi inizialmente incentrati sulle loro caratteristiche fortificatorie e difensive, da cui sono derivate soprattutto le ipotesi sull'organizzazione sociale ed economica della Sardegna protostorica.

Va ricordato, però, che il generico riconoscimento dei nuraghi come strutture esclusivamente difensive assume una dimensione diversa quando si va oltre una rigida definizione militarista e si abbraccia la ricchezza semantica connaturata nel termine 'fortezza'. Questa prospettiva più ampia rivela il ruolo multiforme

dei nuraghi, evidenziando il loro significato al di là della semplice fortificazione militare.

In questa prospettiva viene riletto il complesso nuragico di Palmavera ad Alghero (Fig. 1a), tipico esempio di nuraghe complesso costituito da tre torri con bastione (Fig. 1b) e che presenta un secondo muro concentrico definibile come antemurale strutturato. Questo ultimo tipo di opere murarie, generalmente composte da muri rettilinei, nel caso del nuraghe Palmavera risulta pentagonale (Fig. 1c) e presenta delle torri ai suoi vertici (Fig. 1d), fra cui la maestosa Capanna delle Riunioni. Questa è una condizione peculiare che lo accomuna a pochi altri casi in Sardegna che presentano un antemurale turrito, come il più noto Su Nuraxi di Barumini che presenta sette torri e S'Urachi a San Vero Milis che arriva addirittura a dieci torri (Vanzetti et al., 2013).

2. Il villaggio nuragico di Palmavera

Il complesso nuragico di Palmavera è localizzato nella parte nord-occidentale della Sardegna, nel territorio di Alghero, tra la rada della città e il golfo di Porto Conte. Situato alle pendici del monte Palmavera, in una posizione strategica che permette ampia visibilità sulla fascia costiera, sul tratto di mare del Lazzeretto. Il sito si estende per un'area di circa settemila metri quadri, ma si ipotizza che in origine avesse un'estensione di circa tre ettari.

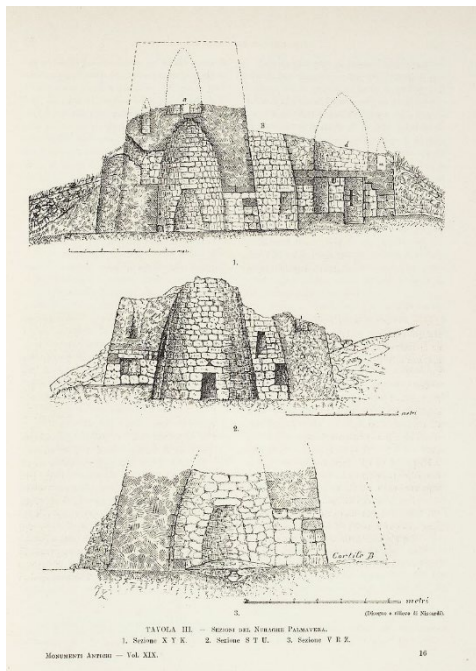


Fig. 2- Tavola II, sezioni del nuraghe Palmavera (Taramelli, 1908, p. 16). Disegno e rilievo di P. Nissardi.

In seguito alla concessione da parte dei proprietari di proseguire le operazioni ai fini della ricerca, la prima campagna di scavo avvenne nel 1904 all'interno di un terreno allora privato. Le operazioni avvennero sotto la direzione di Antonio Taramelli (Fig. 2), archeologo e ispettore dei monumenti in Sardegna, con la collaborazione di Pietro Nissardi, ispettore del Museo di Cagliari. Nel 1961 fu effettuata un'ulteriore campagna di scavo e di consolidamento strutturale. A seguito degli scavi è stata prodotta la prima pubblicazione sul sito (Taramelli, 1908), nella quale è presente, oltre a una descrizione dettagliata degli elementi fino ad

allora emersi, una serie di elaborati grafici che descrivono principalmente la struttura del nuraghe complesso.

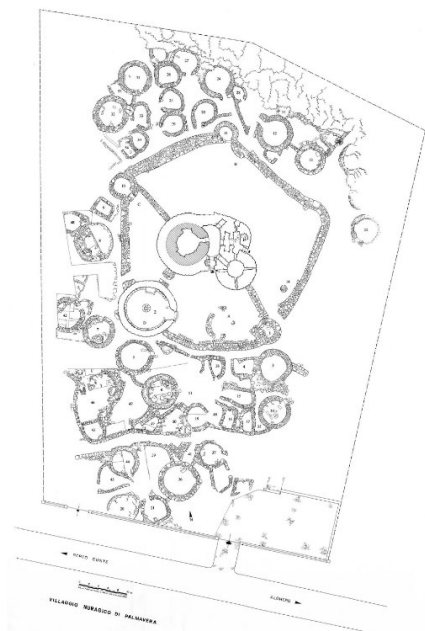


Fig. 3- Planimetria del complesso del nuraghe Palmavera (Moravetti, 1992, p. 46).

Dopo una prima tavola territoriale di inquadramento del sito è possibile osservare la restituzione grafica derivante da un rilievo e dal ridisegno ad opera di Nissardi: due tavole raffiguranti le piante del piano inferiore e superiore del nuraghe; diverse sezioni con ipotesi delle parti mancanti crollate negli anni; numerosa documentazione fotografica, sia del nuraghe prima dello scavo, sia dei diversi particolari strutturali e di oggetti rinvenuti all'interno.

Una seconda pubblicazione (Moravetti, 1992) descrive ampiamente il nuraghe, riprendendo gli studi della pubblicazione precedentemente citata, riportando diversi elaborati grafici e fotografici, ma integrandola con nuovi studi e rilievi. A seguito di un rilievo del 1989 è stata realizzata una prima planimetria completa del sito, oltre che a sezioni, piante e prospetti riguardanti particolari strutturali o elementi singoli del complesso con alcune ipotesi di ricostruzione.

Di particolare interesse risulta la documentazione fotografica del sito, oltre che le foto aeree datate fra il 1988 e 1989.

Le pubblicazioni più recenti integrano principalmente studi su elementi specifici, come la capanna delle riunioni e il betilo torre, oltre che agli oggetti ritrovati nelle capanne.

La frequentazione del complesso, datata grazie al ritrovamento di frammenti di terra cruda e diversi oggetti di uso quotidiano nel villaggio, è riferibile ad un arco cronologico compreso tra la media età del Bronzo e la prima età del Ferro (XVIII-IX/VIII sec. a.C. (Moravetti in *Notiziario di Preistoria e Protostoria*, 2018).

Secondo le ipotesi di Moravetti il nuraghe era formato da solo due torri a Tholos, (Mastio A e Torre secondaria B) esito di diverse fasi costruttive, collegate da un bastione che forma un 'rinfascio' della prima torre e collegato da un cortile a cielo aperto posto in posizione centrale. A seguito degli scavi e del restauro più recente, e come si evince anche dal rilievo illustrato successivamente, è emersa l'esistenza di una terza torre, denominata Torre C. Si ipotizza che la struttura nel corso della storia abbia subito diverse trasformazioni: in una prima fase vi era la presenza di un solo corpo centrale realizzato in calcare e risalente al Bronzo Antico (1400/1600 a.C.); in una seconda fase è avvenuta la trasformazione della struttura in un elemento complesso a tre torri. La struttura originale ha subito un rifascio con la realizzazione del bastione, realizzato in pietra arenaria, e centralmente, rispetto alle tre torri, è stato ricavato il cortile da cui partono le rampe di scale che permettono l'accesso ai livelli superiori. Questa seconda fase è databile ad un periodo compreso tra il Bronzo Medio e Bronzo Recente (1500/1200 a.C.)

Una terza fase realizzata successivamente, tra il Bronzo Recente e il Bronzo finale (1300/1000 a.C.), integra una ristrutturazione con blocchi di calcare a seguito di cedimenti strutturali, la rimozione della terza torre e la muratura del corridoio che la collegava al cortile centrale.

Intorno alla struttura principale del nuraghe è presente un antemurale di forma pentagonale che circonda le tre torri. Questo presenta ai vertici delle torri-capanna e la Capanna delle Riunioni, mentre lo spazio tra bastione e antemurale è suddiviso da setti murari (Vanzetti et al. 2013) All'interno della capanna delle riunioni sono presenti diversi elementi peculiari: il betilo torre in posizione centrale, che costituisce un modello-simulacro, la cui presenza è attestabile in diversi

siti nuragici; il seggio trono, che fa ipotizzare un utilizzo collettivo-religioso dello spazio.

All'esterno delle mura, nella fascia più esterna del complesso è presente un villaggio di circa cinquanta capanne circolari ipoteticamente utilizzate per uso abitativo e un raggruppamento di ambienti quadrangolari (Fig. 3), che sembrano appartenere alla fase più recente del complesso, adibiti ad altro utilizzo (Moravetti, 1992).

3. Rilievo e restituzione grafica

All'interno di questo quadro conoscitivo, la ricerca ha proposto la documentazione e la rappresentazione del sito che si avvale di una metodologia per la digitalizzazione del bene archeologico suddivisa in due fasi. La prima consiste in una campagna accurata di rilievo fotogrammetrico, attraverso il quale è possibile registrare le caratteristiche morfologiche e dimensionali del bene nello stato di conservazione attuale (Bertocci, 2012; Docci et al. 2011). La seconda prevede una modellazione tridimensionale avanzata capace di restituire non solo lo stato attuale, ma anche di visualizzare alcune ipotesi ricostruttive sulla base di teorie avanzate da archeologi al fine di verificare possibili configurazioni originarie (Brusaporci, 2015; Georgopoulos, 2014).

Con l'obiettivo di proporre una ricostruzione tridimensionale del sito, la prima fase ha previsto un'attenta pianificazione della campagna di rilievo fotogrammetrico capace di fornire le caratteristiche dimensionali e cromatiche del sito (Ferdani et al. 2019). Per il rilievo integrato sono stati utilizzati un aeromobile a pilotaggio remoto (APR), una camera *mirrorless* con un obiettivo fisso da 35mm e una *action cam* 360°.

Il rilievo fotogrammetrico aereo è stato effettuato con un *DJI mini 3 pro* un APR di dimensioni ridotte che consente un maggiore controllo in volo a bassa quota. La pianificazione del volo è stata effettuata attraverso l'uso del *software open source* QGIS che ha consentito di pianificare, attraverso l'uso di una griglia a maglia quadrata, le strisciate parallele a una distanza di sette metri, garantendo così una sovrapposizione dei fotogrammi del 80%. Questa distanza tra le strisciate parallele è stata calcolata in relazione alla quota dell'APR – imposta dall'ENAC – che nel caso del sito archeologico del Villaggio nuragico di Palmavera è di 25 metri; ma anche dalla dimensione del sensore imposto



Fig. 5- Elaborazione dei rilievi fotogrammetrici - a. nuvola di punti da foto drone; b. nuvola di punti da macchina fotografica; c. nuvola di punti da action cam 360°; d. unione delle singole nuvole.

dall'apparecchio. Sono stati così realizzati due piani di volo: uno eseguito con la camera nadirale e uno con la camera inclinata di 45° rispetto all'asse zenitale. I due voli, elaborati all'interno di un software per *Structure from Motion*, hanno prodotto circa settecento fotogrammi, 407 i nadirali e 285 quelli obliqui. Questi *set* sono stati elaborati singolarmente e successivamente uniti tramite i *Ground Control Point* (GCP) localizzati in fase di acquisizione. Successivamente sono state processate e allineate alle precedenti le fotografie realizzate con la camera (Sony Alpha 7) che ha consentito l'acquisizione più dettagliata di alcune parti esterne del mastio e dell'intero bastione. Mentre con la *action cam* (Insta360 ONE X2) sono state acquisite foto sferiche al fine di rilevare gli ambienti interni.

L'unione dei differenti *chunk* ha prodotto una nuvola densa di quasi 200 milioni di punti,

successivamente ripulita dai dati relativi alla vegetazione attraverso i software *Agisoft Metashape* e *Cloud Compare*. Il primo ha consentito di fare una prima selezione di punti sulla base del filtro di confidenza (*confidence filter*) attraverso il quale è possibile selezionare solo punti generati dalle mappe di profondità (*depth maps*), e solo successivamente sono stati selezionati i punti per colore, ottenuto dalla stessa nuvola. Questa seconda operazione ha permesso di selezionare i punti attraverso i parametri della tonalità e della saturazione.

Il risultato ottenuto (Fig. 5) è stato importato in *Cloud Compare* dove è stato possibile suddividere il sito in sezioni longitudinali parallele, così da agevolare l'eliminazione manuale della vegetazione bassa più compatta. Successivamente la nuvola pulita è stata reimportata all'interno di *Agisoft Metashape* così



Fig. 6- a. Modello tridimensionale dell'ipotesi ricostruttiva della condizione originale; b. modello tridimensionale dello stato di fatto; c. modello tridimensionale delle ipotesi sostenute dalle geometrie del sito e dalla bibliografia di settore; d. modello tridimensionale degli elementi ipotizzati per similitudine con altri siti nuragici.

da poter generare il modello *mesh* sulla base della nuvola densa e la *texture* attraverso le *depth maps*. Infine, è stata prodotta la mesh unica ripulita e texturizzata che è servita come base per le elaborazioni grafiche successive.

La seconda fase è stata dedicata alla visualizzazione di ipotesi ricostruttive tridimensionali del bene nello stato originario (Fig. 6). Ancorandosi allo stato di fatto ottenuto dal rilievo, l'ipotesi ricostruttiva è stata effettuata su base geometrica e dalla ricostruzione delle fonti bibliografiche in ambito archeologico, integrando le parti assenti nelle fonti bibliografiche sono state ipotizzate attraverso analogie con altre fortezze nuragiche disseminate sul territorio sardo.

Importando la mesh tridimensionale texturizzata, esito del rilievo, all'interno del *software open source Blender*, è stato possibile modellare le parti mancanti. Considerata la dimensione della

maglia triangolare della *mesh*, caratterizzata da una risoluzione particolarmente elevata, è stato necessario un processo di ottimizzazione per renderla maggiormente gestibile.

Questo è stato possibile attraverso il *plug-in JRemesh* che agisce sulle geometrie ridefinendo la topologia della maglia, passando così da una maglia triangolare con 38.000.000 facce a una maglia quadrangolare di circa 7.000.000 facce. Nonostante questa riduzione è stato garantito il mantenimento della forma geometrica ottimizzando solo la topologia. Inoltre, la *texture* è stata trattata in modo da ridurre le aberrazioni e moderare le ombre reali derivanti dalle fotografie.

Dopo l'ottimizzazione del modello base è stato possibile avviare la modellazione che si è articolata in alcune fasi operative. La prima è consistita in una modellazione di massima, in cui sono stati inseriti i volumi geometrici di base in maniera coerente alle informazioni geometrico-

strutturali che è stato possibile estrapolare dal rilievo sul campo e dalla mesh tridimensionale.



Fig. 7- texture utilizzata per la trama muraria delle strutture ipotizzate in fase di modellazione.

Nella fattispecie le tre torri e il bastione sono state modellate utilizzando tronchi di cono realizzati a partire dall'inclinazione delle strutture residue del nuraghe, mentre l'altezza e l'ampiezza sono state ipotizzate sulla base degli studi archeologici. La struttura dell'antemurale è stata realizzata in maniera analoga, utilizzando gli elementi residui come traccia per la modellazione e integrandole con i documenti archeologici.

La seconda fase ha riguardato la realizzazione della *texture* utilizzata per la trama muraria delle strutture ipotizzate in fase di modellazione. Questa è stata ottenuta a partire dal materiale fotografico acquisito in fase di rilievo, e successivamente elaborato attraverso il software *Adobe Substance 3D Sampler*, con il quale è stato possibile ottenere un materiale di tipo PBR (*Physically-Based Rendering*), in grado di simulare le caratteristiche tridimensionali del materiale che costituisce la struttura del nuraghe (Fig. 7).

Attraverso il pannello di VPL del motore di render si è potuto replicare l'effetto dei materiali originariamente impiegati nella struttura del nuraghe (Scandurra & Lanzara, 2023). Questo è stato successivamente applicato ai volumi tridimensionali realizzati nella fase precedente, consentendo di ottenere una resa il più possibile realistica. In questa fase è stato utilizzato il *Displacement Mapping*, che permette di aggiungere dettagli a una superficie (Doggett et al. 2003). Questa tecnica consente di utilizzare immagini bidimensionali in bianco e nero per elaborare delle forme geometriche definite *low poly*, riducendo il numero di poligoni della *mesh* per generare una determinata forma geometrica. A tal proposito nel caso studio questa procedura è stata utilizzata per rappresentare la costruzione del muro realizzato in pietra, sfruttando la texture

ad alta qualità elaborata tramite *Adobe Substance 3D Sampler*.

4. Conclusioni e prospettive

Le operazioni di rilievo e ricostruzione digitale del complesso nuragico di Palmavera ad Alghero hanno permesso di ottenere una documentazione dettagliata dello stato attuale del sito e di proporre ipotesi ricostruttive basate su dati archeologici, storici e topografici. La metodologia adottata, che ha integrato tecniche di rilievo fotogrammetrico aereo e terrestre con la modellazione tridimensionale avanzata, ha evidenziato l'importanza di un approccio multidisciplinare nel campo dell'archeologia digitale. Questa combinazione ha garantito la creazione di un modello digitale accurato che rappresenta lo stato di conservazione del sito e offre anche una visualizzazione efficace delle possibili configurazioni originarie del complesso nuragico.

I risultati ottenuti offrono nuove possibilità per la fruizione e la valorizzazione del patrimonio archeologico della civiltà nuragica. In particolare, il modello 3D permette un'esplorazione interattiva e immersiva del sito, migliorando l'accessibilità sia per il pubblico che per i ricercatori. Questo approccio può essere utilizzato per sviluppare piattaforme educative e divulgative, consentendo una comprensione più profonda della complessità architettonica e sociale di Palmavera.

Le prospettive di ricerca future includono l'estensione della metodologia ad altri siti nuragici per favorire la creazione di un archivio digitale integrato dei beni archeologici della Sardegna. Un'altra direzione promettente riguarda l'uso di tecnologie immersive come la realtà virtuale (VR) e aumentata (AR) per sviluppare esperienze interattive che facilitino la fruizione del sito anche a distanza. Inoltre, approfondimenti sullo stato di conservazione delle strutture murarie potrebbero contribuire allo sviluppo di strategie di restauro più efficaci, basate su modelli di degrado realistici ottenuti dalla documentazione digitale.

In conclusione, la ricerca apre nuove strade per l'interpretazione e la valorizzazione del patrimonio nuragico, evidenziando il potenziale delle tecnologie digitali nel supportare studi archeologici più completi e nel promuovere un'ampia diffusione della conoscenza storica e culturale.

Note

(1) I “Monumenti della civiltà Nuragica” coinvolti nella ricerca del laboratorio GRA·VIS LAB: 1. Tomba di giganti di Coddù ‘Ecchju Arzachena (OT); 2. Complesso culturale di Predio Canopoli, Perfugas (SS); 3. Nuraghe Palmavera, Alghero (SS); 4. Nuraghe Appiu, Villanova Monteleone (SS); 5. Fonte sacra di

Su Tempiesu, Orune (NU); 6. Villaggio di Serra Orrios, Dorgali (NU); 7. Nuraghe Orolo, Bortigali (NU); 8. Villaggio nuragico Sa Sedda ‘e sos Carros, Oliena (NU); 9. Tombe di giganti di Madau, Fonni (NU); 10. Santuario nuragico di S’Arcu ‘e is Forros, Villagrande Strisaili (NU); 11. Nuraghe Ponte, Dualchi (NU).

Bibliografia

- Bernardini, P. (2016). *Le torri di Monte Prama: i nuraghi nel paesaggio culturale dell'età del Ferro*. In E. Trudu, G. Paglietti, & M. Muresu (A cura di), *Layers. Archeologia Territorio Contesti*, 1, 66-85.
- Bertocci, S., & Bini, M. (2012). *Manuale di rilievo architettonico e urbano*. Città studi edizioni.
- Brusaporci, S. (2015). *On visual computing for architectural heritage*. IGI Global.
- Docci, M., Chiavoni, E., & Filippa, M. (2011). *Metodologie integrate per il rilievo, il disegno, la modellazione dell'architettura e della città*. Gangemi Editore.
- Doggett, M., Forsyth, T., & Productions, M. (2003). Displacement mapping. *ATI Research*, 1-5.
- Ferdani, D., Demetrescu, E., Cavalieri, M., Pace, G., & Lenzi, S. (2019). 3D modelling and visualization in field archaeology. From survey to interpretation of the past using digital technologies. *GROMA: Documenting Archaeology*, 4.
- Georgopoulos, A. (2014). 3D virtual reconstruction of archaeological monuments. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 14(4), 155-155.
- Moravetti, A. (1992). *Il complesso nuragico di Palmavera*. Carlo Delfino Editore.
- Pais, M. (2018). *Palmavera (Alghero, SS)*. In Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria, *Notiziario di Preistoria e Protostoria*, 5.II, Sardegna e Sicilia (pp. 74-76). Istituto Italiano di Preistoria e Protostoria.
- Scandurra, S., & Lanzara, E. (2023). Vpl for Cultural Heritage Monitoring: Sampling and Comparison of Photographic Images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 48, 1435-1442.
- Taramelli, A. (1908). *Il nuraghe Palmavera presso Alghero*. In *Monumenti Antichi* (Vol. 19, pp. 225-272). Accademia Nazionale dei Lincei.
- Vanzetti, A., Castangia, G., Depalmas, A., Ialongo, N., Leonelli, V., Perra, M., & Usai, A. (2013). *Complessi fortificati della Sardegna e delle isole del Mediterraneo occidentale nella protostoria*. Edizioni Quasar. In *Scienze dell'antichità* (Vol. 19, Fascicoli 2/3).