

**F. FLORA, S. BOLLANTI, P. DI LAZZARO,
L. MEZI, D. MURRA**

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Laboratorio Applicazioni dei plasmi
ed esperimenti interdisciplinari
Centro Ricerche Frascati

F. ANDREOLI

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Laboratorio Tecnologie Nucleari
Centro Ricerche Frascati

M. DE FRANCESCHINI, G. VENEZIANO

Osservatorio astronomico di Genova
Via Superiore al Gazzo, 16154 - Genova

A. FORLINI, S. LIEBSCHWAGER

Via Piave 61, 00187 Roma

SIMULATORE SOLARE E STAMPE 3D

Una nuova tecnica per l'analisi astronomica
di siti archeologici

RT/2023/16/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

F. FLORA, S. BOLLANTI, P. DI LAZZARO,
L. MEZI, D. MURRA

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Laboratorio Applicazioni dei plasmi
ed esperimenti interdisciplinari
Centro Ricerche Frascati

F. ANDREOLI

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare
Laboratorio Tecnologie Nucleari
Centro Ricerche Frascati

M. DE FRANCESCHINI, G. VENEZIANO

Osservatorio astronomico di Genova
Via Superiore al Gazzo, 16154 - Genova

A. FORLINI, S. LIEBSCHWAGER

Via Piave 61, 00187 Roma

SIMULATORE SOLARE E STAMPE 3D

Una nuova tecnica per l'analisi astronomica
di siti archeologici

RT/2023/16/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina www.enea.it

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

SIMULATORE SOLARE E STAMPE 3D

Una nuova tecnica per l'analisi astronomica di siti archeologici

F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, A. Forlini, S. Liebschwager, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano

Riassunto

Le moderne tecnologie di acquisizione di immagini tridimensionali (3D) tramite droni, unite alla disponibilità di stampanti 3D commerciali accurate e di ampie dimensioni, aprono nuove frontiere nello sviluppo di plastici in scala che possono riprodurre fedelmente strutture architettoniche e paesaggi naturali.

In questo lavoro si dimostra come il plastico di un sito archeologico, se illuminato con un simulatore solare, permette di ottenere una dettagliata analisi arqueo-astronomica del sito stesso, difficilmente realizzabile in loco.

Parole chiave: Archeologia, Astronomia, Bussola solare, Drone, Grotta Tiberio, Simulatore solare, Stampante 3D.

Abstract

Modern three-dimensional (3D) imaging technologies using drones, combined with the availability of accurate and large-scale commercial 3D printers, have opened new frontiers to the development of scaled models that can faithfully reproduce architectural structures and natural landscapes.

In this paper, we demonstrate how any model of archaeological sites illuminated with a solar simulator allows for a detailed arqueo-astronomical analysis, which is difficult to achieve in situ

Keywords: Archaeology, Astronomy, Drone, Solar compass, Solar simulator, Tiberius Cave, 3D printer.

INDICE

1 - Introduzione.....	7
2 - Il simulatore solare.....	7
3 - Il plastico della grotta di Sperlonga.....	11
4 - Verifiche tramite il simulatore solare.....	12
5 - Oltre le verifiche	15
6 - Simulazione del Convertitore dei Solstizi.	19
Conclusioni.....	21
Ringraziamenti.....	21
Bibliografia.....	22

Simulatore solare e stampe 3D: una nuova tecnica per l'analisi astronomica di siti archeologici

1 - Introduzione

Negli ultimi anni la tecnologia dei droni ha avuto uno rapido sviluppo [1] tale da raggiungere un'elevata stabilità di volo. Questo consente di scattare centinaia di fotografie di un oggetto, di un edificio, o di un intero sito, ciascuna associata alle coordinate geografiche del drone, inclusa la quota. A partire dalle molteplici foto scattate, i software di Fotogrammetria [2] consentono di ottenere un'unica immagine 3D dell'oggetto rilevato. Ottenuta l'immagine 3D, è possibile stamparla in modo da ottenere un plastico dell'oggetto, estremamente fedele e dettagliato.

Questa tecnica ha aperto nuove frontiere soprattutto nel campo dell'edilizia e nella riproduzione di siti geografici e archeologici. Il livello di fedeltà nella riproduzione del plastico di un sito archeologico può essere così elevato da consentirne un uso scientifico, anziché meramente scenico.

In questo articolo proponiamo l'abbinamento tra il plastico 3D del sito archeologico della grotta di Tiberio a Sperlonga (LT) ed un simulatore solare, che permette di ottenere una dettagliata analisi arqueo-astronomica della grotta in ogni giorno dell'anno, difficilmente realizzabile in situ.

2 - Il simulatore solare

Il simulatore solare è un dispositivo che riproduce il moto apparente del Sole grazie ad una sorgente luminosa installata su un braccio meccanico mobile in grado di riprodurre la direzione dei raggi solari per qualsiasi ora e data ad una fissata latitudine.

Immaginiamo di porre un oggetto al centro di un mappamondo cavo e di posizionare una lampada sulla superficie del mappamondo orientata verso l'oggetto al centro in modo da simulare l'illuminazione del sole. La lampada deve poter variare sia la sua longitudine (rotazione oraria) e sia la sua latitudine (rotazione di declinazione) nella zona tra i due tropici, in cui il Sole passa verticalmente (allo zenit) almeno un giorno all'anno.

La Fig. 1 mostra uno schema di un simulatore solare per l'emisfero settentrionale.

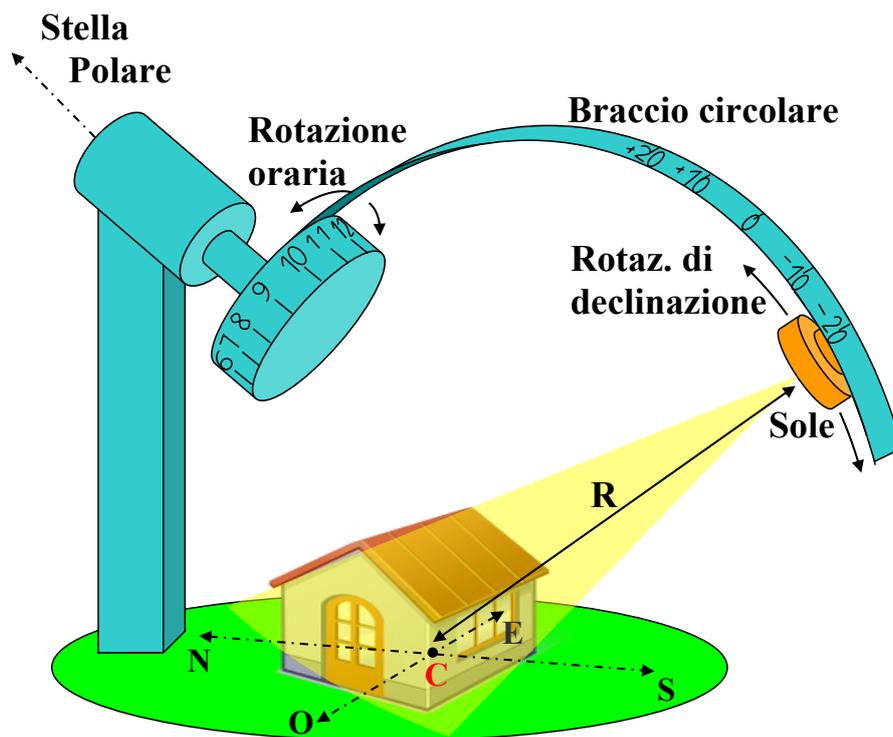


Figura 1: Esempio di simulatore solare: l'oggetto (casa) si trova al centro "C" della curvatura del braccio circolare che regge la lampada che simula il sole. La rotazione oraria avviene intorno ad un asse che punta il polo Nord celeste (stella Polare), la cui inclinazione dipende dalla latitudine del luogo. In questa figura il Sole si trova alle ore 12:00 del solstizio invernale (-23.5° di declinazione).

Per semplicità di costruzione, un simulatore solare non utilizza il sistema orario degli orologi, detto Tempo Medio "TM" perché basato sulla durata media annua del giorno solare, bensì il Tempo Vero del Luogo "TVL", il sistema orario usato dalle meridiane, per il quale alle ore 12:00, in quel luogo, il Sole è effettivamente a metà giornata, cioè è all'apice del suo percorso apparente in cielo e, visto dalle latitudini dell'emisfero settentrionale, la sua proiezione sull'orizzonte indica esattamente la direzione Sud, cioè il Sole si trova di fronte al meridiano del luogo.

Per passare da TM a TVL è necessario tener conto della longitudine del luogo e delle variazioni stagionali della differenza tra tempo vero solare e tempo medio. Questa differenza, definita Equazione del Tempo (ET), è dovuta al fatto che gli orologi assumono (erroneamente) che la durata dei giorni sia sempre la stessa. È sufficiente quindi utilizzare la semplice equazione:

$$TVL = TMg + Long/15^\circ + ET \quad (1)$$

dove TMg è l'ora di Greenwich e ciascun elemento dell'equazione è espresso in ore con decimali.

Nella Fig. 2 sono riportati i valori dell'equazione del tempo e della declinazione del Sole in funzione della data dell'anno.

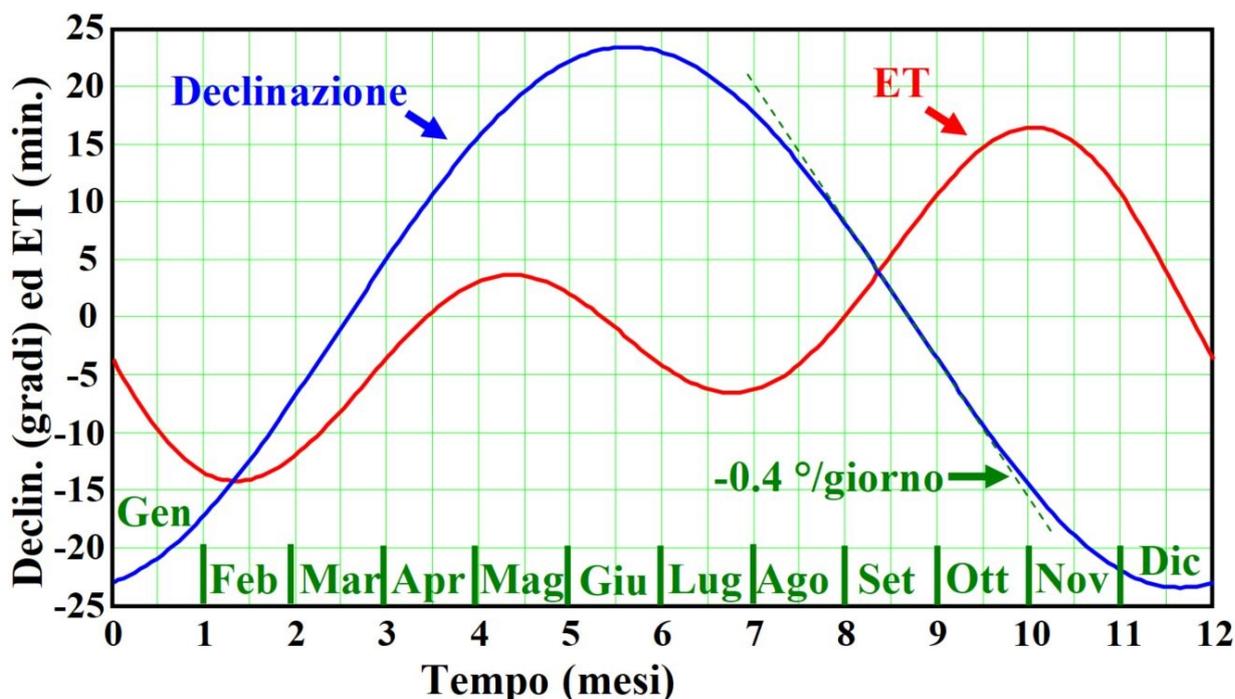


Figura 2: Equazione del tempo ET (in minuti) e declinazione del Sole (in gradi) dal 1° gennaio al 31 Dicembre calcolati al giorno d'oggi.

Un importante vantaggio dei simulatori solari è di poter “viaggiare nel tempo”. Ad esempio, 2.000 anni fa i valori di declinazione erano superiori di circa l'1%, rispetto a quelli attuali riportati in Fig. 2, a causa della maggiore inclinazione dell'asse terrestre (+0.25°). Per simulare l'illuminazione solare di 2.000 anni fa in una certa data è quindi sufficiente posizionare la lampada del simulatore a valori di declinazione maggiorati del 1% rispetto a quelli riportati nella Fig. 2.

Il simulatore utilizzato in questo lavoro è stato ottenuto modificando un simulatore solare del Centro Didattico delle Meridiane di Aiello del Friuli [3] che ha il meccanismo di rotazione sotto al piano dell'oggetto, quindi verso il polo Sud celeste, anziché sopra, ma è del tutto equivalente al simulatore di Fig. 1.

Rispetto al simulatore originale, abbiamo apportato alcune modifiche nella motorizzazione della rotazione del braccio circolare, e abbiamo inserito 3 lampade (ancorate al braccio) posizionate alla declinazione dei due solstizi ($+23.7^\circ$ e -23.7°) e degli equinozi (0°) nel primo secolo d.C., quindi con le declinazioni estreme incrementate dell'1% rispetto a quelle attuali riportate nella Fig. 2.

In un simulatore solare, la lampada ideale dovrebbe essere munita di un collimatore in modo da emettere un fascio di luce parallela come quella solare e quindi avente la medesima direzione su tutto il plastico illuminato. In alternativa, come mostrato nella Fig. 1, è possibile utilizzare lampade comuni, che emettono un cono di luce divergente, purché abbiano un diametro "D" abbastanza piccolo da far sì che il rapporto tra il diametro e la distanza "R" tra la lampada ed il centro "C" sia simile a quello solare, cioè corrisponda ad un angolo di 0.5° . Quindi deve essere: $D/R = \tan(0.5^\circ) \sim 1\%$. In questo caso, però, la direzione della luce riproduce esattamente quella del Sole solo in una piccola zona intorno al centro "C", mentre altrove si incorre in un errore causato dalla divergenza della luce emessa dalla lampada. Ad esempio, allontanandosi dal centro del 5% di R, l'errore di direzione dei raggi è pari a $\arctan(0.05) \sim 3^\circ$.

Va inoltre precisato che nei casi in cui sia importante osservare la proiezione dell'ombra generata da un elemento del plastico, l'uso di lampade a luce divergente amplifica, sul piano di proiezione dell'ombra, gli eventuali errori di decentramento tra l'elemento di interesse del plastico ed il centro "C" del simulatore.

Il nostro simulatore ha un valore $R \approx 30$ cm. La regione, centrata in "C" in cui l'errore del simulatore rimane inferiore a 3° è di appena 3 cm di diametro. Non potendo limitare le dimensioni del plastico del sito archeologico a dimensioni così piccole, siamo stati costretti, di volta in volta, a traslare il plastico, mantenendo il parallelismo tra i punti cardinali del plastico e quelli del simulatore, in modo da portare vicino a "C" la porzione di plastico che in quel momento si desiderava illuminare con i raggi che simulano il Sole.

A causa delle limitazioni sulla precisione della meccanica del simulatore, l'accuratezza che si può ottenere è di circa $1^\circ - 2^\circ$, corrispondenti a 4 - 8 minuti di spostamento del Sole.

Anche qualora si utilizzino collimatori, la lampada dovrebbe essere sufficientemente piccola da generare idealmente una penombra di circa 0.5° .

Le lampade del nostro simulatore solare sono LED la cui superficie emittente è di 2 cm. Li abbiamo diaframmati al fine di ridurre la dimensione della sorgente di luce a circa 1 cm di diametro, pari quindi al 3% di R, anziché l'1% desiderato. Non potendo diaframmare ulteriormente le lampade per evitare un eccessivo calo di luminosità, la penombra è circa tre volte quella solare.

3 - Il plastico della grotta di Sperlonga

Abbiamo ottenuto il plastico della grotta di Sperlonga stampando in 3D l'immagine tridimensionale ricavata da una rielaborazione di fotogrammetria di immagini scattate sia manualmente nella grotta (dove è vietato l'uso di droni) sia con drone all'esterno del sito archeologico.

La scala della stampa è 1:300, scelta in modo che il plastico possa assolvere ad una doppia funzione: quella di poter essere analizzato per via tattile da persone non-vedenti/ipovedenti, e quella di poter essere abbinato al simulatore solare.

La dimensione del plastico, circa 25 cm di diametro, supera ampiamente il limite di 3 cm in cui l'errore del simulatore rimane entro i 3° e quindi la simulazione dei raggi solari è accurata solo nella regione del plastico situata vicino al centro del braccio circolare.

Al fine di poter accedere all'interno del plastico della grotta, sia visivamente sia con una mano, la stampa 3D è limitata ad una altezza corrispondente a circa 4 m reali, inferiore agli 11 m di altezza della grotta, in modo che il plastico della grotta sia senza la parte superiore. La Fig. 3 mostra il confronto fra una schermata dell'immagine 3D ed una foto del plastico realizzato.

L'immagine 3D nella Fig. 3b non ha un riferimento preciso rispetto alla direzione Nord-Sud. Per individuare tale direzione nel plastico corrispondente (Fig. 3c), abbiamo fatto riferimento alle accurate misure eseguite con la bussola solare ENEA [4-9], che assegnano alla retta di congiunzione tra il centro del portale di fondo della nicchia A ed il centro di curvatura della nicchia S, retta denominata "Traguardo di Tiberio", un azimut di 238° rispetto al Nord geografico. Il plastico è collocato sul piano del simulatore in modo da rispettare l'orientamento di tale retta rispetto alla direzione Nord-Sud del simulatore.

La Fig. 3c mostra i 3 luoghi più importanti per le simulazioni, che sono stati fatti coincidere con il centro "C" del simulatore solare per la riproduzione dell'illuminazione di ognuno di essi: le due nicchie interne A e B e la nicchia a semiluna esterna alla grotta S.

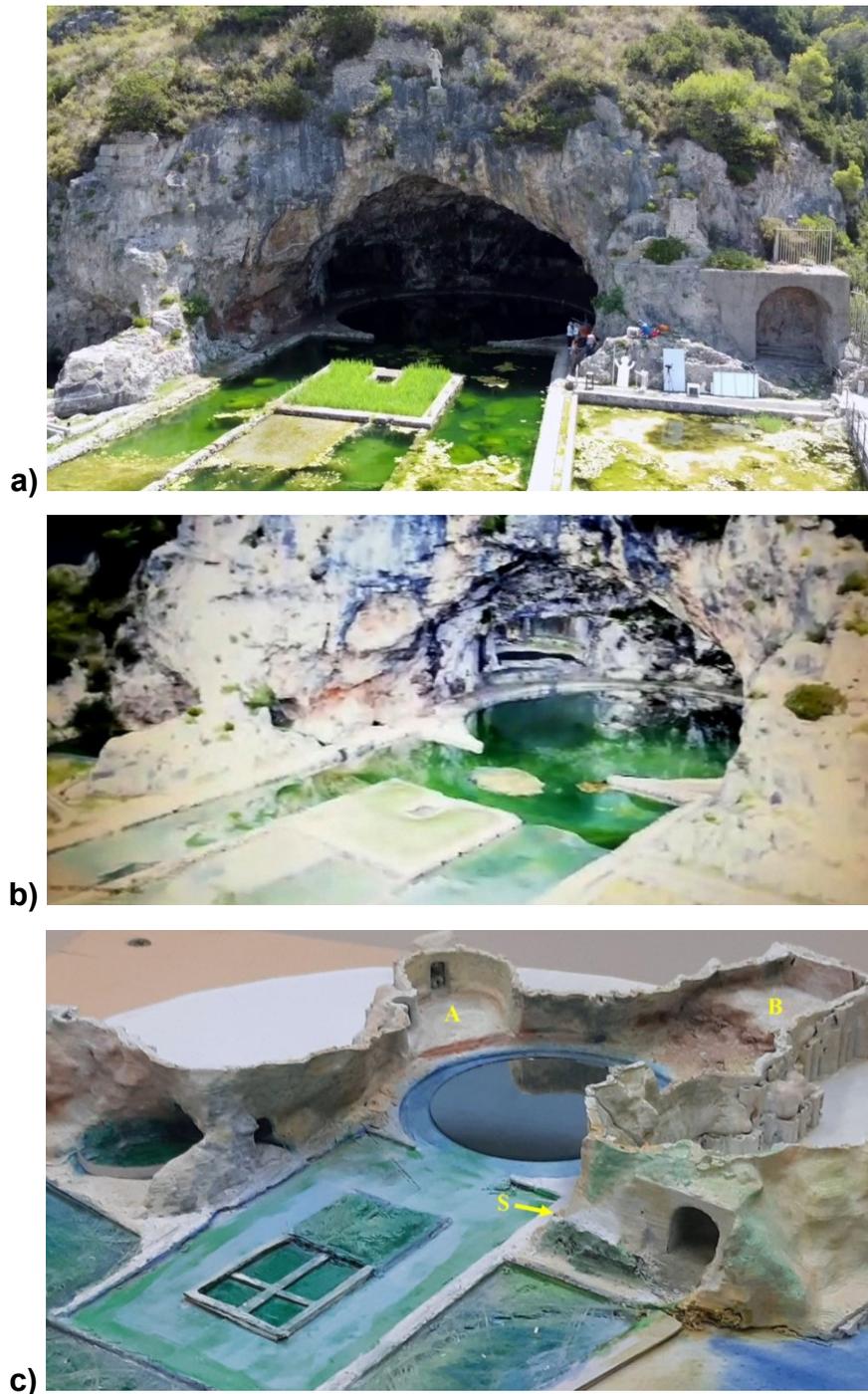


Figura 3: a) Foto della grotta durante l'esperimento di luglio 2022 [9]; b) Schermata di una delle vedute dell'immagine 3D; c) foto del plastico in scala 1:300. Nel plastico sono indicate le due nicchie interne (A e B) e la nicchia a semiluna esterna alla grotta (S). La zona blu in basso a destra del plastico riproduce il mare.

4 - Verifiche tramite il simulatore solare

La prima verifica riguarda l'orientamento delle due nicchie interne A e B con la direzione del Sole al tramonto del solstizio invernale ed estivo, rispettivamente [10].

Come mostrato nelle Figg. 4 e 5, sono confermati sia la piena illuminazione solare delle nicchie, sia l'allineamento tra la direzione del Sole e l'asse di simmetria di ciascuna nicchia, in corrispondenza dei relativi solstizi.

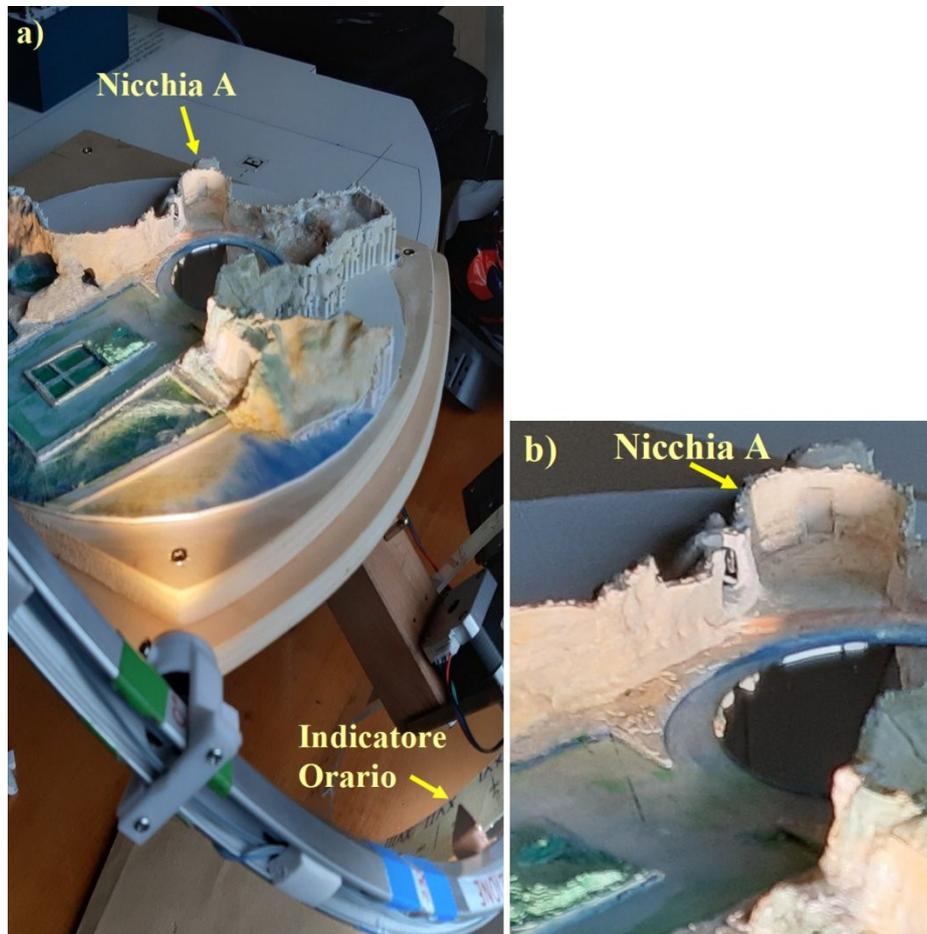


Figura 4: a) Simulazione dell'illuminazione della nicchia A il 21 Dicembre del primo secolo d.C. all'ora del tramonto sul mare (TVL ~ 16:30, vedi l'indicatore del rotatore orario in basso a destra). b) Zoom del fondo della nicchia A con una tenda bianca nel portale di accesso al cubicolo. Il centro "C" del simulatore coincide con il centro della nicchia A.

In particolare, nella Fig. 4b si può notare che, al momento del tramonto, lo scoglio sovrastante la nicchia a semiluna "S" in Fig. 3b è proiettato sul fondo della nicchia A.

La seconda verifica riguarda la proiezione dell'ombra di uno gnomone, posto nella nicchia esterna a semiluna "S", sul centro del portale di fondo della nicchia A al tramonto della data del solstizio invernale [4, 5, 7, 8], nonché la simulazione del percorso dell'ombra nell'ultima mezz'ora prima del tramonto. Si è voluto quindi simulare il fenomeno luminoso concomitante con il solstizio grazie all'uso del "Traguardo di Tiberio" definito in [4-9].

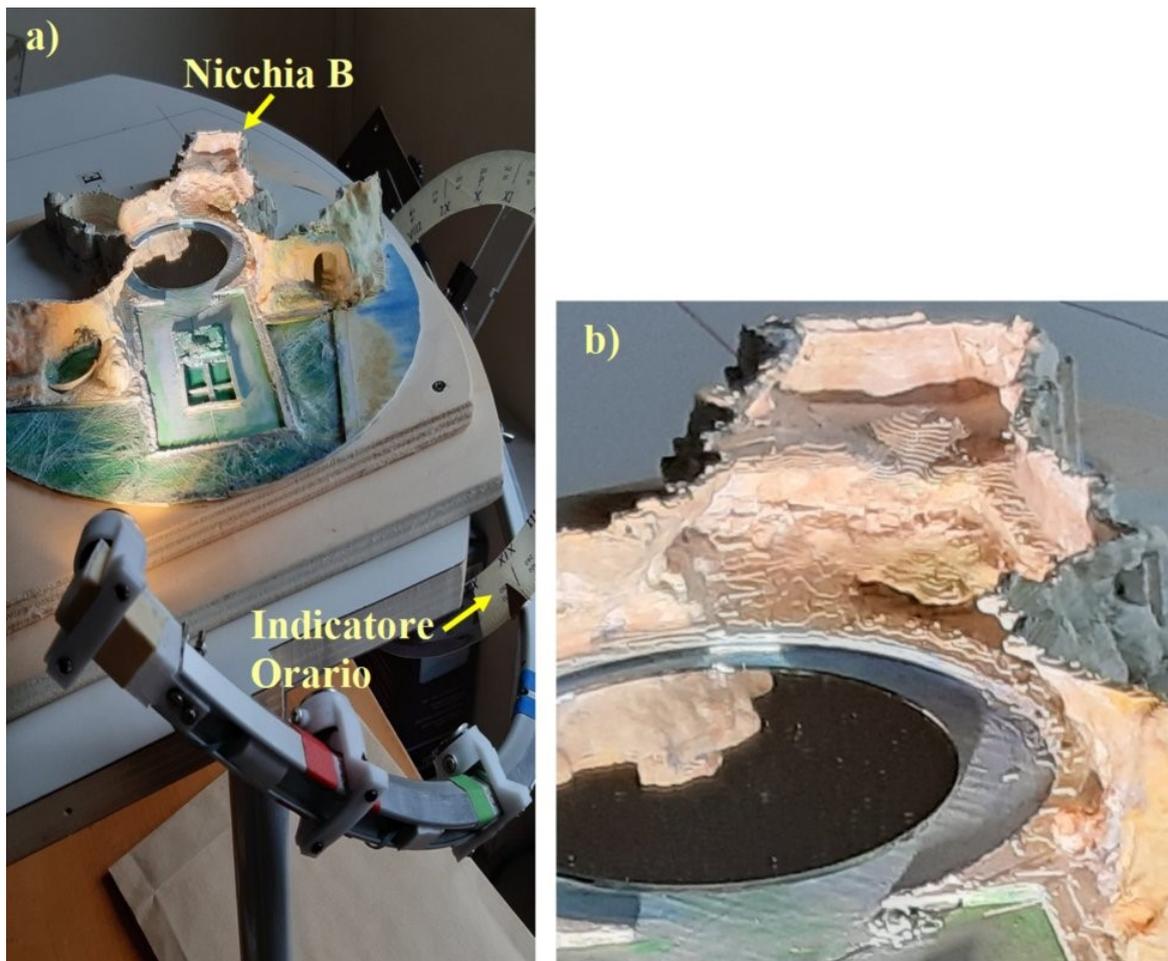


Figura 5: a) Simulazione dell'illuminazione della nicchia B il 21 Giugno del primo secolo d.C. all'ora del tramonto su Sperlonga (TVL=19:15, vedi l'indicatore del rotatore orario in centro a destra, cioè circa le 20:30 TM includendo l'ora legale estiva). b) Zoom del fondo della nicchia B, dove era collocata la scultura dell'accecamento di Polifemo. Il centro "C" del simulatore coincide con il centro della nicchia B.

Per questo esperimento si è posto nella nicchia esterna "S" uno gnomone di altezza pari a quella calcolata per i tempi di Tiberio, circa 1.6 m di quota a partire dal livello superiore del muretto a semiluna della nicchia, ma di diametro circa triplo di quello utilizzato negli esperimenti a Sperlonga [8, 9] per compensare la maggiore penombra generata dalle lampade del simulatore che è 3 volte quella solare. La Fig. 6 mostra l'ombra dello gnomone nella nicchia A nell'ultima mezz'ora del 21 dicembre ai tempi di Tiberio.

Come si può notare dalla sequenza in Fig. 6, il percorso dell'ombra e l'orario in cui sono raggiunte le varie posizioni dell'ombra sono, entro l'accuratezza del simulatore, in ottimo accordo con le osservazioni sperimentali eseguite a Sperlonga al solstizio invernale 2021 e al solstizio estivo 2022 utilizzando il convertitore dei solstizi [9].

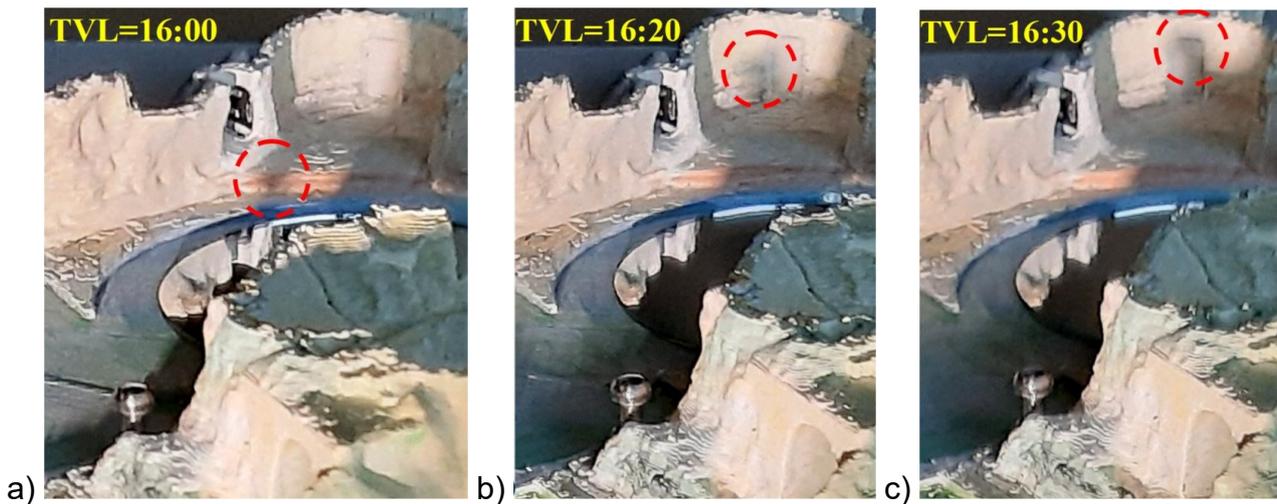


Figura 6: Simulazione della proiezione dell’ombra dello gnomone del Traguardo di Tiberio nell’ultima mezz’ora prima del tramonto del Sole il 21 dicembre del primo secolo d.C. $TVL_{\text{tram}} = 16:31':22''$. Il cerchio rosso tratteggiato evidenzia la posizione dell’ombra dello gnomone. Il centro “C” del simulatore coincide con lo gnomone entro qualche mm di errore di allineamento.

5 - Oltre le verifiche

Il simulatore solare consente di verificare/illustrare ciò che si è già visto sul luogo, ma soprattutto permette di analizzare fenomeni difficilmente osservabili in situ, come ad esempio il percorso dell’ombra di un oggetto (lo gnomone nel nostro caso) durante un periodo di un intero anno alla stessa ora del giorno o nella stessa fase della giornata, ad esempio la fase del tramonto.

Il simulatore ha permesso di scoprire che nel periodo dall’equinozio di autunno il 23 Settembre a quello di primavera il 21 Marzo, ogni sera poco prima del tramonto l’ombra dello gnomone emerge dall’acqua della piscina circolare, risale il gradino di contorno alla vasca ed infine, poco prima che il Sole scompaia sul mare, è proiettata sulla roccia della parete che congiunge il portale del cubicolo della nicchia A (raggiunto dall’ombra al solstizio invernale) a sinistra della scultura dell’accecamento di Polifemo nella nicchia B raggiunta dall’ombra agli equinozi, come mostrato nella Fig. 7.

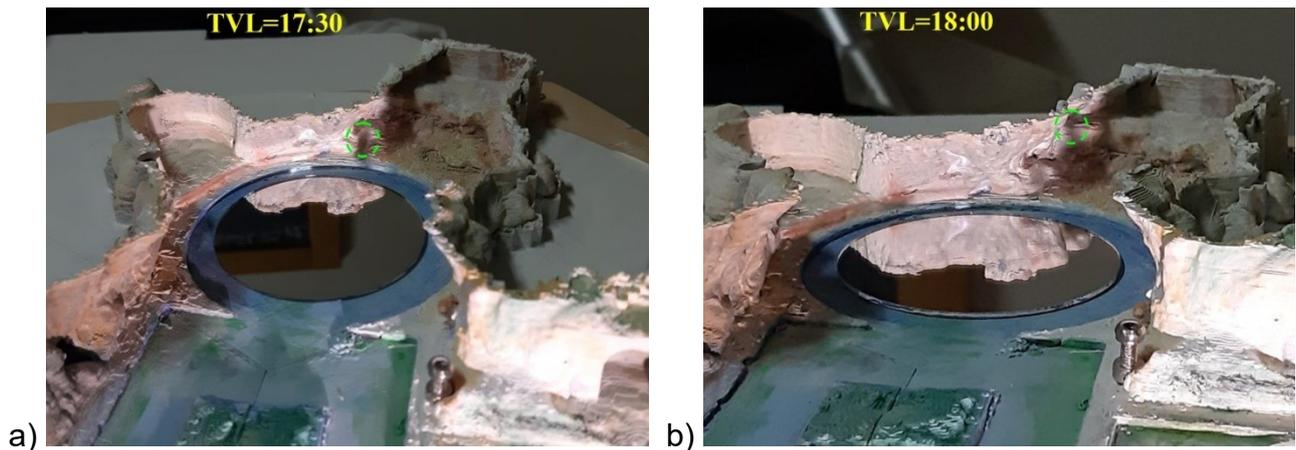


Figura 7: Simulazione dell'illuminazione della grotta all'equinozio del 21 Marzo del primo secolo d.C.: a) mezz'ora prima e b) nel momento del tramonto sul mare (TVL=17:30 e 18:00, rispettivamente). Il cerchio verde tratteggiato evidenzia l'ombra dello gnomone. Il centro "C" del simulatore coincide con lo gnomone (entro gli errori di allineamento di qualche mm).

L'ombra di uno gnomone proiettata nella nicchia A, oltre a evidenziare il solstizio invernale, avrebbe potuto anche indicare la data di un qualsiasi giorno dell'anno, come se la grotta fosse l'ultimo mezzo spicchio di un'enorme meridiana, del tipo usato dagli antichi romani, cioè il "polos". Ricordiamo che il polos è una semicalotta sferica su cui sono tracciati 12 spicchi, corrispondenti alle 12 ore babiloniche comprese tra alba e tramonto, con un'asta metallica che funge da gnomone al centro della calotta.

Questo tipo di meridiana, chiamato "scafo" dai romani dopo l'eliminazione della parte di calotta che non era raggiunta dall'ombra dello gnomone, era molto diffuso nel primo secolo d.C. e lo stesso Tiberio ne aveva una, ora conservata nel Museo di Sperlonga. Un esempio di scafo romano è mostrato nella Fig. 8, evidenziando l'ultimo mezzo spicchio, corrispondente alla dodicesima ora babilonica, l'ultima ora prima del tramonto, limitatamente alla porzione che va da un mese prima dell'equinozio di autunno al mese successivo all'equinozio di primavera.

L'altezza gnomonica, cioè la distanza tra lo gnomone ed il piano di proiezione di questa ipotetica meridiana in grotta, è di 30-40 m, paragonabile solamente alla grande meridiana di Augusto di cui si sono ritrovati pochi elementi in Campo Marzio a Roma [12].

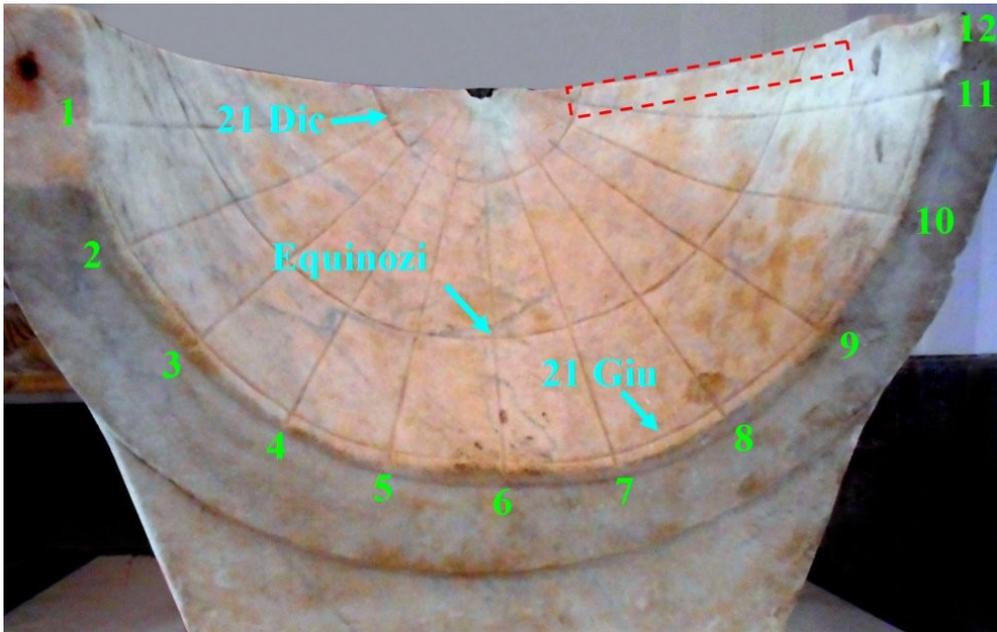


Figura 8: Meridiana romana di tipo “scafo” tratta da [11]. La numerazione delle ore babiloniche è evidenziata in verde mentre gli equinozi e solstizi sono indicati dalle linee curve. Il rettangolo rosso indica la porzione di scafo corrispondente all’ipotetica meridiana individuabile nella grotta di Tiberio.

Per dare un’idea approssimativa di come cambi con le stagioni il punto in cui l’ombra dello gnomone emerge dalla vasca circolare (circa mezz’ora prima del tramonto), la Fig. 9 mostra una foto della grotta scattata dalla posizione dello gnomone al centro della nicchia a semiluna “S” cui viene sovrapposto in modo approssimato, compatibilmente con le deformazioni tipiche di una foto e con la struttura non planare della grotta, il calcolo di una meridiana eseguito in base all’inclinazione dell’asse terrestre ai tempi di Tiberio.

La meridiana sovrapposta in Fig. 9 corrisponde al rettangolo arancione dell’insero e corrisponde approssimativamente al rettangolo azzurro evidenziato nella foto dello scafo in Fig. 8. L’insero di Fig. 9 mostra il calcolo di una moderna meridiana a ore TVL, che differiscono poco dalle ore TM dei nostri orologi e comunque sono facilmente riconducibili al TM tramite l’equazione (1), utilizzato per estrarre da essa le linee di cambio del segno zodiacale, vedi le linee gialle sovrapposte alla foto della grotta.

La meridiana nella Fig. 9 consente di avere un’idea, secondo il nostro attuale sistema orario, di come cambi l’ora con le stagioni, oltre alla posizione in cui l’ombra dello gnomone emerge dalla piscina risale sulla roccia della grotta e raggiunge al momento del tramonto la stessa quota dello gnomone. In particolare, nei giorni del 21 del mese l’ombra segue la corrispondente linea gialla in Fig. 9 e ne raggiunge la sommità al tramonto.

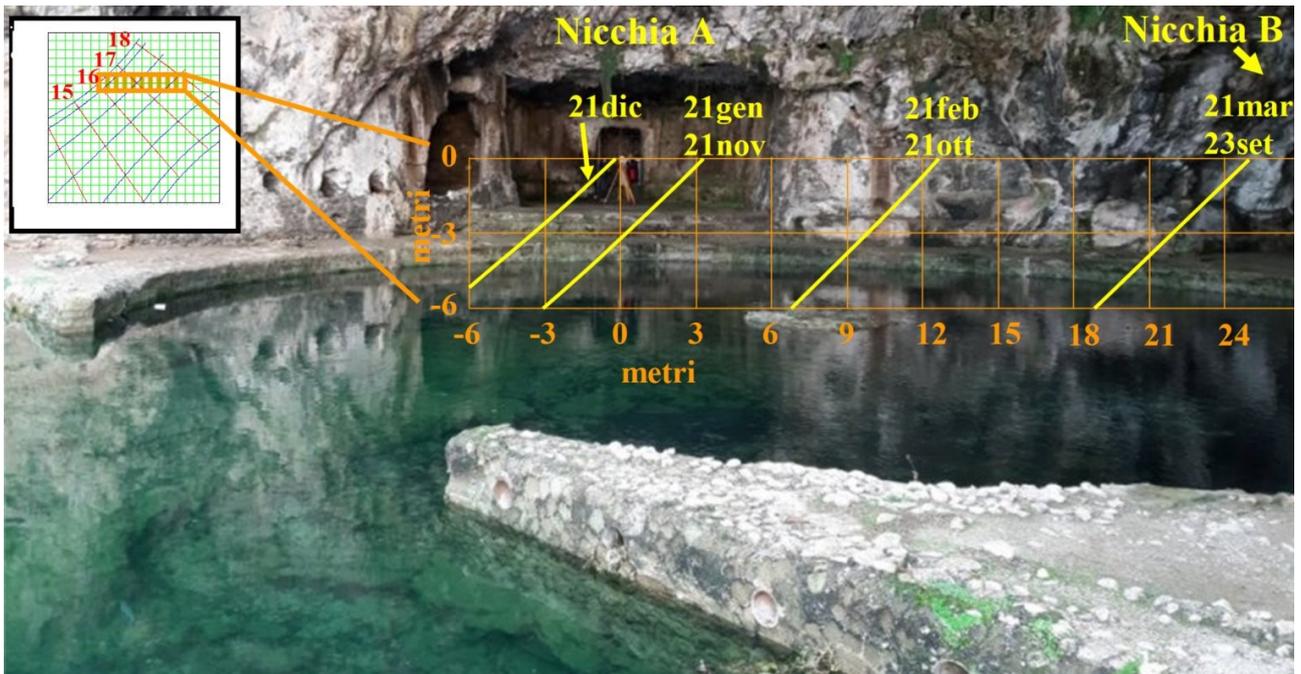


Figura 9: Sovrapposizione di una foto della grotta di Tiberio con una porzione del disegno di una meridiana (nell’insero) calcolata per una parete verticale piana coincidente con il muro di fondo della nicchia A avente un azimut di 238° pari a quello del Traguardo di Tiberio e uno gnomone la cui proiezione geometrica coincide con il centro del portale e dista 40 m da esso. Le linee gialle indicano il percorso dell’ombra dello gnomone in prossimità del tramonto per le date di cambio del segno zodiacale (il giorno 21 di ogni mese) e derivano dal calcolo della meridiana a ore TVL moderne riportata nell’insero.

La posizione da cui è stata scattata la foto nella Fig. 9 coincide con quella dello gnomone e ciò consente di ridurre gli errori dovuti al fatto che la grotta è curva e non piana come nel calcolo della meridiana dell’insero. Tuttavia, l’accuratezza della simulazione è limitata dalle deformazioni dell’obiettivo fotografico e risulta di pochi decimetri vicino al portale al centro della nicchia A, cioè vicino alla proiezione geometrica dello gnomone sul muro di fondo della nicchia A, ma, allontanandosi, l’accuratezza peggiora fino a superare un metro in prossimità della nicchia B. Per conoscere con precisione il percorso dell’ombra dello gnomone nelle diverse date di interesse, lo strumento più indicato è il simulatore solare abbinato al plastico della grotta.

La direzione dei raggi solari al tramonto delle date di interesse, in questo caso quelle di cambio segno zodiacale, è confermata dall’App “ENEA Mobile Sun Compass” sviluppata da ENEA ed ora disponibile su PlayStore per trasformare uno smartphone in una bussola solare [13-16], che nella funzione “Effemeridi” consente di ottenere la direzione dei raggi solari al tramonto di qualsiasi data, anche di 2.000 anni fa. Possiamo così sovrapporre alla

pianta della grotta le rette che rappresentano la direzione dei raggi solari nelle date di cambio segno zodiacale, come mostrato nella Fig. 10.

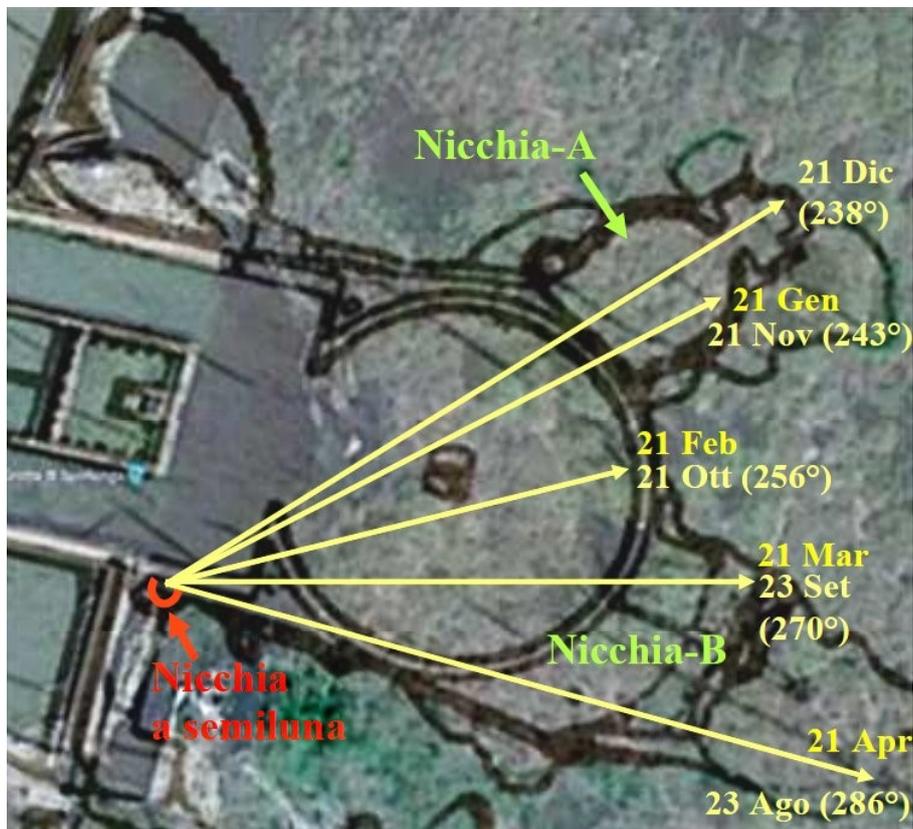


Figura 10: Orientamento dei raggi solari al tramonto delle date di cambio segno zodiacale nel primo secolo d.C., ottenute tramite l'App "ENEA Mobile Sun Compass". Tra parentesi sono riportati i valori di azimut dei raggi solari -le frecce gialle- rispetto al Sud ovvero del Sole rispetto al Nord.

6 - Simulazione del Convertitore dei Solstizi.

La verifica sperimentale in situ del "Traguado di Tiberio" eseguita al solstizio estivo del 2022, è stata effettuata con l'ausilio del "Convertitore dei Solstizi" [9] come suggerito in [17], cioè, illuminando uno gnomone con i raggi solari riflessi da uno specchio disposto parallelamente al piano dell'Equatore terrestre e collocato a Sud dello gnomone e vicino ad esso. La direzione dei raggi riflessi era identica a quella dei raggi del Sole alla stessa ora TVL ma 6 mesi prima, cioè al solstizio invernale [9].

Per riprodurre in scala questo esperimento tramite il simulatore solare, si è posizionato nel plastico uno specchietto, subito dietro lo gnomone, con la normale puntata verso la stella polare, il Nord del simulatore, e inclinata rispetto al piano orizzontale di un angolo $41^{\circ}:15'$ pari alla latitudine del luogo, come mostrato nella Fig. 11.



Figura 11: Il Convertitore dei solstizi aggiunto sul retro dello gnomone nel plastico della grotta di Tiberio.

Nella Fig. 12 è riportato il risultato della simulazione del Convertitore dei Solstizi durante l'ultima mezz'ora prima del Tramonto di Tiberio (16:30 del 21 dicembre), usando la lampada posizionata in modo da simulare il Sole al 21 Giugno. Il risultato va confrontato con quella eseguita, senza lo specchio convertitore, il 21 Dicembre nella Fig. 6.

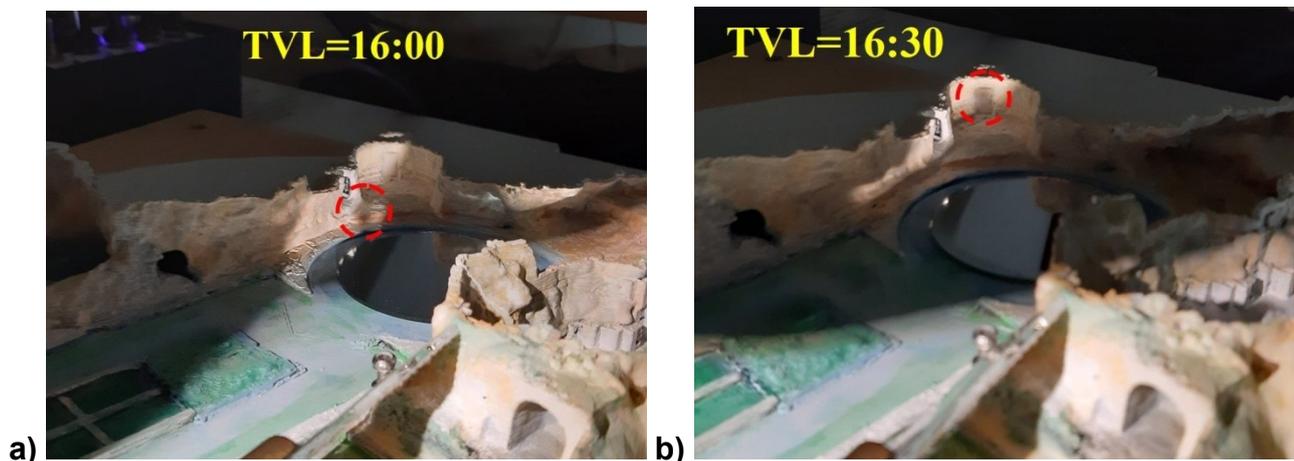


Figura 12: Simulazione solare con il Convertitore dei Solstizi per la data del 21 Giugno a) mezz'ora prima e b) al momento del Tramonto di Tiberio. Il cerchio rosso tratteggiato indica la posizione dell'ombra dello gnomone. Si è oscurata la radiazione diretta, cioè quella che avrebbe illuminato la nicchia A senza riflessione e che nella realtà il 21 giugno è bloccata dal soffitto della grotta. Il centro "C" del simulatore coincide con lo gnomone, al centro della nicchia a semiluna "S".

Confrontando la Fig. 12 con la Fig. 6 si può notare che il funzionamento del convertitore si riscontra anche nel plastico: alla stessa ora TVL del solstizio estivo i raggi riflessi dal convertitore proiettano l'ombra dello gnomone esattamente nella direzione in cui essa viene proiettata il 21 dicembre quando lo gnomone è illuminato direttamente dal Sole, senza il convertitore.

Conclusioni

L'uso della fotogrammetria per la riproduzione in plastici 3D di siti archeologici offre oggi possibilità inedite, grazie all'elevato livello di fedeltà nella riproduzione, perché la funzionalità di alcuni dettagli del sito può essere evidenziata grazie all'uso del plastico.

In questo articolo abbiamo proposto l'abbinamento di un simulatore solare con il plastico di un sito archeologico di interesse arqueo-astronomico, la Grotta di Tiberio a Sperlonga, in provincia di Latina. Questo abbinamento consente di verificare l'allineamento di alcune zone della grotta con la posizione del Sole in momenti particolari della giornata, come alba, tramonto, mezzogiorno, ecc. in qualsiasi giorno dell'anno e in particolare in date significative come solstizi, equinozi, festività.

Questa simulazione solare ha consentito non solo di verificare tutti gli allineamenti solari della grotta di Tiberio già individuati in precedenti misure in situ [4-9], ma anche di formulare l'ipotesi di una particolare meridiana all'interno della grotta non rilevabile in loco. Per la sua conformazione, infatti, la parete della grotta tra le nicchia A e B si presenta come possibile piano di proiezione dell'ombra dello gnomone che si presume fosse collocato nella nicchia esterna. Lo gnomone avrebbe potuto indicare il giorno del solstizio invernale, ma avrebbe permesso di visualizzare lo scorrere delle stagioni. La sua ombra, infatti, al momento del tramonto nei vari giorni dell'anno, si sposta dalla nicchia A all'inizio della nicchia B. Di conseguenza, l'intera grotta si prestava ad essere utilizzata come un'enorme meridiana, mostrata nelle Figg. 9 e 10.

Ringraziamenti

Si ringrazia il prof. Carlo Bressan del "Centro Didattico delle Meridiane" di Aiello del Friuli (UD) per aver donato all'ENEA il Simulatore Solare utilizzato in questo articolo e la dott.ssa Cristiana Ruggini, Direttrice del Museo Nazionale di Sperlonga, per la disponibilità nell'attività sperimentale di analisi e studio degli orientamenti nella grotta di Tiberio. Si ringrazia il sig. Giorgio Di Giorgio (ENEA) per aver contribuito alla stampa 3D del plastico della grotta.

Bibliografia

- [1] Vedi ad esempio [https://it.wikipedia.org/wiki/DJI_\(azienda\)](https://it.wikipedia.org/wiki/DJI_(azienda))
- [2] La fotogrammetria automatica: come funziona e a cosa serve, <https://www.3d-archeolab.it/2017/04/tutorial-la-fotogrammetria-automatica-come-funziona-a-cosa-serve/>
- [3] Centro Didattico delle Meridiane di Aiello del Friuli
<http://www.ilpaesedellemeridiane.com/simulatori/x.htm>
- [4] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: *High-accuracy orientation survey in the Tiberius' Cave near Sperlonga*, Journal of Cultural Heritage, vol. 55, pp. 138–142, (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2022.03.008>
- [5] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: *Misure di orientamento ad alta precisione con bussola solare ENEA nell'Area archeologica della Grotta di Tiberio a Sperlonga*, Atti del 22° Seminario di Archeoastronomia, Edizioni ALSSA, pp. 31-52 (2020).
<https://www.alssa.it/wp-content/uploads/2020/12/Atti-del-22%C2%B0-Seminario.pdf>
- [6] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, D. De Meis, G.P. Gallerano, P. Di Lazzaro, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: *Era Andromeda a celebrare il solstizio invernale nella Grotta di Tiberio a Sperlonga?* Atti del 23° Seminario di Archeoastronomia, Edizioni ALSSA, pp. 58-69 (2021). <https://www.alssa.it/2021/11/05/atti-seminario-23/>
- [7] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: *La bussola solare Enea in archeoastronomia - Rilievi di orientamento nella Grotta di Tiberio a Sperlonga*, Rapporto Tecnico ENEA, RT/2021/1/ENEA (2021).
<https://iris.enea.it/retrieve/handle/20.500.12079/56121/9041/RT-2021-01-ENEA.pdf>
- [8] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, D. De Meis, P. Di Lazzaro, A. Forlini, G. P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: *Il Traguardo di Tiberio a Sperlonga: prime verifiche solari del suo funzionamento*, Atti del 24° Seminario di Archeoastronomia, Edizioni ALSSA, pp. 38-52. 14-15 Maggio 2022. <https://www.alssa.it/wp-content/uploads/2022/12/Atti-24%C2%B0-Seminario-3.pdf> .
- [9] F. Andreoli, S. Bollanti, M. De Franceschini, P. Di Lazzaro, F. Flora, A. Forlini, F. Maierna, L. Mezi, D. Murra, G. Veneziano: *Esperimento di Conversione dei Solstizi*, Rapporto Tecnico ENEA, RT/2023/1/ENEA (2023). <https://iris.enea.it/retrieve/49db0494-49d6-46e1-9c07-4708c364ac60/RT-2023-01-ENEA.pdf>

- [10] M. De Franceschini, G. Veneziano: *Archeoastronomia nella Villa di Tiberio a Sperlonga (Latina)*, Atti del 21° Seminario di Archeoastronomia Edizioni ALSSA, Genova 30-31 Marzo 2019, pp. 8-29. <https://www.academia.edu/41603628>
- [11] Foto di meridiana dell'antica Roma tratta da:
<https://www.flickr.com/photos/70125105@N06/45218653641/in/photostream/> .
- [12] E. Buchner: *Die Sonnenuhr des Augustus*, 1982. Vedi anche: *La meridiana di Augusto*, <https://www.romanoimpero.com/2017/06/la-meridiana-di-augusto.html>.
- [13] F. Flora, S., D. De Meis, P. Di Lazzaro, G. P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, A. Torre, D. Vicca: *Dalle meridiane alla bussola solare ENEA*, Atti del XXI Seminario Nazionale di Gnomonica, Valdobbadiene 24-26 Marzo 2017, pp. 83-86 (2017).
<https://www.researchgate.net/publication/324248271>
- [14] F. Flora, F. Andreoli, S. Bollanti, D. De Meis, G.P. Gallerano, P. Di Lazzaro, L. Mezi, D. Murra, L. Murra, D. Vicca, G. Vicoli: *Bussola solare di alta precisione: un utile strumento per l'archeoastronomia*, Atti del 21° Seminario di Archeoastronomia, Edizioni ALSSA pp. 34-53, 2019. <https://www.alssa.it/wp-content/uploads/2020/08/Atti-Seminario-21-2019.pdf>
- [15] S. Bollanti, F. Andreoli, L. Cafarella, D. De Meis, P. Di Lazzaro, D. Di Mauro, F. Flora, G.P. Gallerano, L. Mezi, D. Murra, L. Murra, D. Vicca, G. Vicoli, and A. Zirizzotti: *Accurate and low-cost ENEA solar compass for precision metrology of true azimuth: instrumental and smart versions*, proceedings of SPIE Photonics Europe, 2020, Vol. 11352, 1135216 doi: 10.1117/12.2555747 (2020).
<https://www.researchgate.net/publication/340370931>
Citato dal North Americal Sundial Society as *ENEA Solar Compass soon to be smartphone App*, vedi <https://sundials.org/index.php/all-things-sundial/digital-sundials/317-enea-solar-compass-soon-to-be-smartphone-app>
- [16] F. Andreoli, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, L. Mezi, D. Murra, L. Murra: *Converting a smartphone into an accurate solar compass*, Applied Optics **61**, 1398-1402 (2022).
<https://doi.org/10.1364/AO.450501>
- [17] A. Forlini: *Figlia del Sole: il convertitore dei solstizi*, Atti del 23° Seminario di Archeoastronomia, Edizioni ALSSA, pp. 70-82, 2021.
<https://www.alssa.it/2021/11/05/atti-seminario-23/>

ENEA
Servizio Promozione e Comunicazione
www.enea.it

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati
luglio 2023