

# “CANNE DI PIOMBO ASCOSE”. TECNICHE GEOMATICHE PER UN NUOVO RILIEVO DELLA GROTTA DEGLI ANIMALI DELLA VILLA MEDICEA DI CASTELLO

*In the past, the need to exhaustively document the gardens and artificial grottoes collided with the difficulty to survey and render their organic geometries. Also because of this reason, restoration Charters tended to overlook the issue of survey. The current geomatic techniques, through high resolution sampling, allow the acquiring of realistic and correct representations, also from a metric point of view. However, the use of digital models derived from automatic measuring tools does not guarantee their quality. This can be validated by strict control of the procedures and by means of metadata, i.e. the information describing the data and how they are obtained. The new survey contributed to the knowledge of the historical hydraulic system and its restoration and suggests that drawing A 1640v refers to the state before installation of the cladding. Future research will examine the narrow tunnels in the retaining wall around the grotto.*

## Premessa

Le criticità evidenziate in passato nella documentazione dei giardini manieristi e degli apparati di fontane, grotte e ninfei che li connotano sono da riferirsi alla difficoltà di misurare e restituire quelle forme organiche che ne costituiscono l'essenza, se non ricorrendo a rappresentazioni semplificative di ridotta capacità descrittiva<sup>1</sup>. Le attuali tecnologie di digitalizzazione tridimensionale, proprie della geomatica, grazie alla elevata risoluzione di campionamento, consentono di dettagliare geometrie articolate senza rinunciare alla accuratezza metrica a condizione che si rispetti un rigore metodologico nel processo di acquisizione e trattamento dei dati. Il nuovo rilievo della grotta degli Animali, condotto dal GeCo Lab dell'Università di Firenze<sup>2</sup> nell'ambito di una convenzione di ricerca con il Polo museale della Toscana ha costituito una nuova e intrigante sfida sia per il superamento del problema della forma, considerata un ostacolo epistemologico prima della diffusione delle tecnologie digitali 3D, sia per la comprensione del funzionamento originario della rete dell'impianto idraulico di cui è stata ipotizzata la riattivazione dei giochi d'acqua.

Il presente contributo osserva dapprima il ruolo attribuito al rilievo dalle Carte del Restauro in genere e in particolare da quelle dei giardini storici; esamina quindi le criticità del rilievo dei giardini e delle grotte artificiali e i progressi resi

possibili in questo ambito dalle tecniche di acquisizione automatica di dati spaziali, dando evidenza anche di fattori che consentono di valutare la qualità del modello digitale ottenuto. La parte conclusiva è dedicata agli aspetti, meno consueti, della grotta degli Animali che il nuovo rilievo ha concorso a documentare.

## Il rilievo nelle Carte del Restauro e dei Giardini

Le ben note 'Carte del Restauro'<sup>3</sup> rappresentano, anche nelle loro omissioni, una testimonianza significativa dell'importanza attribuita al rilievo nel processo della conservazione. La Carta di Atene (1931) prescrive “precisi rilievi” solo per gli scavi archeologici destinati a essere rinterrati. Quella di Venezia (1964) parla di “rigorosa documentazione, con relazioni analitiche e critiche, illustrate da disegni e fotografie”, senza discriminare tra la redazione di appunti sparsi e la realizzazione di un rilievo metrico sistematico. La Carta italiana del Restauro (1972) indica, finalmente, i contenuti del progetto di restauro, affermando che “si baserà su un completo rilievo grafico e fotografico da interpretare anche sotto il profilo metrologico”.

Diventa quindi significativo che nella Carta dei Giardini storici (o Carta di Firenze, 1981), frutto di un periodo di particolare impegno per la tutela dei giardini, uno “studio approfondito che vada dallo scavo alla raccolta di tutta la documentazione concernente il giardino” sia ritenuto suffi-

ciente ad assicurare il “carattere scientifico” di un intervento di restauro o persino di ripristino, senza neppure prescrivere di verificare sul campo la consistenza delle parti superstiti per discernere se si tratti dell'una o dell'altra modalità di intervento. La “Carta italiana per il restauro dei giardini storici”, dello stesso anno, dà indicazioni più puntuali, indicando la necessità di studiare il giardino “in tutte le sue componenti (architettoniche, vegetali, idriche, geologiche, topografiche, ambientali, etc.) e attraverso documenti e fonti storiche e letterarie, e attraverso rilievi, topografici e catastali antichi, nonché ogni altra fonte iconografica”. Tra gli ambiti di indagine richiesti è quindi finalmente elencata l'informazione spaziale, suggerendo anche il ricorso alla tecnica topografica, in effetti la più idonea tra quelle allora diffusamente disponibili.

## Tecniche tradizionali VS tecniche digitali per il rilievo di grotte manieriste

Nonostante tale indicazione, molti studi sui giardini sono stati eseguiti senza l'ausilio di una documentazione grafica attendibile ed aggiornata, al limite solo per confrontare con la consistenza attuale le fonti documentarie proprie della ricerca storica.

Una giustificazione può essere riconosciuta a coloro che si sono trovati a studiare forme organiche e complesse, come quelle dei giardini, delle loro architetture e specificatamente delle grotte



pagina 83

Fig. 1 Modello mesh dell'interno della grotta.

Fig. 2 Firenze, Villa medicea di Castello, Grotta degli Animali. A sinistra in alto: intradosso della volta sopra la vasca dell'Unicorno. Prima campagna di rilievo GECO (9-10 agosto 2012) effettuata per rilevare la volta a distanza ravvicinata da un ponteggio. A destra in alto: seconda campagna di rilievo GECO (5 febbraio 2013) per rilevare la grotta da terra. A sinistra in basso: terza campagna di rilievo GECO (9 ottobre 2013), per la prima fase di acquisizione degli scavi che hanno messo in luce il sistema idraulico all'estradosso della volta. A destra in basso: ultima campagna di rilievo GECO (ottobre 2018) relativa alle intercapedini circostanti la grotta e che contengono parte dell'apparato idraulico; dettaglio del vano sotto la statua del Gennaio.

<sup>1</sup> Per un panorama delle problematiche del rilievo dei giardini nel periodo immediatamente precedente la diffusione delle attuali tecnologie si veda *La rappresentazione del paesaggio e del giardino nel rilievo e nel progetto architettonico*, a cura di E. Varon, Milano 1998.

<sup>2</sup> Da anni il rilievo e la rappresentazione di insiemi polimerici è oggetto di una specifica linea di ricerca del laboratorio GeCo che, grazie agli studi condotti su casi eccellenti come quelli dell'Appennino del Giambologna ed altri manufatti del parco mediceo di Pratolino, ha potuto sperimentare e definire specifici flussi di lavoro in grado di rispondere alle domande delle molteplici professionalità che confluiscono nello studio dei giardini e del paesaggio, con i più aggiornati strumenti scientifici della conoscenza.

<sup>3</sup> Per una raccolta delle Carte del Restauro si veda <https://www.icomos.org/en/charters-and-other-doctrinal-texts> (in inglese).

<sup>4</sup> G. TUCCI, *Note sul rilievo dei giardini*, in *I tempi della natura. Restauro e restauri dei giardini storici*, a cura di M.A. Giusti, Firenze 1999, pp. 39-46.

<sup>5</sup> M. DEZZI BARDESCHI et al., *Note sui metodi di rilevamento e restituzione grafica dell'Appennino*, in *Risveglio di un colosso. Il restauro dell'Appennino del Giambologna*, catalogo della mostra (Pratolino, 22 luglio-25 settembre 1988), a cura di C. Acidini Luchinat, Firenze 1988, pp. 75-77. Una più ampia selezione di tavole è pubblicata in *L'Appennino del Giambologna. Anatomia e identità del gigante*, a cura di A. Vezzosi, Firenze 1990.

<sup>6</sup> C. CONFORTI, *Il rilievo architettonico degli apparati del giardino: esempi di grotte*, in *Arte delle Grotte: per la conoscenza e la conservazione delle grotte artificiali*, atti del convegno (Firenze, 17 giugno 1985), a cura di C. Acidini Luchinat, L. Magnani, M.C. Pozzana, Genova 1987, pp. 25-30.

<sup>7</sup> C. CONFORTI, *La grotta "degli animali" o del "diluvio" nel giardino di Villa Medici a Castello*, "Quaderni di Palazzo Te", 4, 1987, 6, pp. 71-80.

<sup>8</sup> Nell'accezione relativa al rilievo, per digitalizzazione si intende il processo con cui una superficie, caratterizzata da valori continuamente variabili, è convertita in valori discreti misurando le coordinate 3-D di punti che, nel loro insieme, determinano un modello digitale della realtà. Entro i limiti dell'accuratezza strumentale, minore è la distanza tra i punti, maggiore è la risoluzione e quanto più quest'ultima è elevata, tanto minore è la differenza tra geometria reale e modello virtuale.

Per una panoramica sul tema della digitalizzazione dei beni culturali, G. GODIN et al., *Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated techniques*, "IEEE Computer Graphics and Applications", 24, 2004, 3, pp. 21-29 e P. GRUSSENMEYER et al., *Accurate documentation in cultural heritage by merging TLS and high-resolution photogrammetric data*, in *Videometrics, Range Imaging, and Applications XI*, conference proceedings (Munich, 23-26 May 2011), edited by F. Remondino, M.R. Shortis, vol. 8085, 2011, p. 808508.

<sup>9</sup> G. TUCCI, A. CONTI, L. FIORINI, *Scansioni laser per il rilievo dei giardini storici*, "GEOmedia", 17, 2013, 6.

<sup>10</sup> G. TUCCI et al., *Digital Workflow for the Acquisition and Elaboration of 3D Data in a Monumental Complex: the Fortress of Saint John the Baptist in Florence*, international symposium paper (Ottawa, 28 August-1 September 2017), "International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science", XLII-2/W5, 2017, pp. 679-686.

artificiali, con gli strumenti del rilievo manuale tradizionale che non offriva indicazioni su quelli che oggi definiremmo protocolli di acquisizione e gestione dei dati<sup>4</sup>.

La difficoltà di rilevare opere di tale complessità è testimoniata nella relazione del rilievo dell'Appennino del Giambologna, coordinato da Marco Dezzi Bardeschi e Luigi Zangheri e realizzato da Emilio Sacchini e Elisa Sambataro<sup>5</sup> in cui i rilevatori riconoscono di essersi "accontentati" di un sistema da essi definito "organico" che, a differenza di un consueto rilievo architettonico, permetteva solamente "verifiche e raffronti" tra parti. Claudia Conforti<sup>6</sup> ha sostenuto che il rilievo di grotte artificiali, eseguito misurando i punti significativi secondo il criterio della trilaterazione, non possa dare origine altro che a un "modello geometrizzato [...] che tende inevitabilmente a evidenziare la matrice originaria e artificiosa dell'oggetto, anteriore al processo di «naturalizzazione»". Nei rilievi proposti dalla studiosa la continuità tra i punti misurati è ricostruita con curve tracciate a mano libera e privilegiando tecniche grafiche più evocative che oggettive quali gli sfumati, i chiaroscuri, i puntinati. Se ciò era accettabile in anni in cui le restituzioni erano necessariamente eseguite a mano, è meno comprensibile la scarsità di informazioni che possono risultare essenziali per ricostruire la fase più recente della vita di un'opera. Il rilievo della grotta degli Animali<sup>7</sup> è la prima rappresentazione sistematica del complesso ed è importante anche perché rappresenta l'andamento del suolo prima dei lavori che nel 1994 hanno messo in luce gli impianti all'estradosso della copertura. Tuttavia, almeno nella forma pubblicata, non sono visibili le quote e i piani di sezione, inoltre sono presenti i soli nomi degli esecutori senza ulteriori informazioni sull'anno di realizzazione, se si tratti di un lavoro professionale o eseguito da studenti, dove sia conservato, etc. Se si considera che un rilievo può essere inte-

so come testimonianza dello stato odierno di un manufatto, è evidente la necessità di tendere al massimo grado di oggettività consentito dagli strumenti disponibili e di fornire tutte le indicazioni utili a valutare l'affidabilità delle informazioni che contiene.

Le tecnologie geomatiche, mediante il campionamento ad alta risoluzione<sup>8</sup>, permettono di superare queste criticità, consentendo rappresentazioni rigorose dal punto di vista metrico e della rappresentazione grafica indipendentemente dalla complessità delle geometrie<sup>9</sup>.

Il modello di punti che ne deriva può essere utilizzato come "replica" della realtà (o almeno di alcune sue proprietà) per supportare varie fasi del processo della conservazione<sup>10</sup>, dalla redazione del progetto di restauro<sup>11</sup>, alla realizzazione di modelli interpretativi utili anche alle analisi strutturali<sup>12</sup> e alla simulazione di processi di varia natura<sup>13</sup>. Il modello digitale deve essere quindi inteso non solo come una mera rappresentazione del manufatto, ma come archivio tridimensionale di dati correlabili reciprocamente e strutturati secondo convenzioni omogenee: un registro flessibile, integrabile, trasmissibile e condivisibile<sup>14</sup>.

### Qualità del modello digitale

La verosimiglianza dei modelli digitali e il fatto che provengano da strumenti automatici di misura non garantiscono in toto tuttavia la loro qualità e possono anzi indurre a scelte fondate su dati inaffidabili.

Le fasi del rilievo, dall'acquisizione alla rappresentazione, devono essere progettate in vista della conoscenza e della corretta documentazione di un bene culturale. È la progettazione del rilievo che può e deve certificare la qualità del modello risultante attestandone l'idoneità all'interno del processo complessivo di conservazione<sup>15</sup>. Il progetto di rilievo dovrà indicare gli strumenti per controllare e documentare l'acquisizione, l'elaborazione e conservazione del dato e l'affi-



dabilità delle rappresentazioni proposte. Prima di intraprendere l'azione mensoria, si dovrà meditare sulle criticità del manufatto, chiarire quale grado di completezza dei dati è richiesto e come conseguirlo, come progettare una rete di misurazioni non limitata esclusivamente al raggiungimento di un obiettivo immediato ma che, in potenza, possa essere ampliata e integrata, possibilmente con un contenuto informativo tale da poter essere interpretato anche secondo chiavi di lettura inizialmente non previste.

La qualità di un dato e dunque del modello cui appartiene può essere definita attraverso i 'metadati', ovvero le informazioni che descrivono il dato stesso e il metodo impiegato per il suo conseguimento<sup>16</sup>. I metadati devono quindi essere considerati parte integrante e qualificante del modello e accompagnarli in tutti i suoi utilizzi. Sotto il profilo metrico, il primo stadio di questo controllo si esplica, come nel caso della grotta degli Animali, con la misura di una rete topografica, materializzata in modo permanente, per la definizione *una tantum* di un sistema di riferimento comune di tutti gli elementi, anche ubicati a grandi distanze, per referenziare dati acquisiti in tempi e con metodologie differenti e

per documentare le trasformazioni successive; nel caso del rilievo della grotta ad esempio, durante le varie fasi di scavo all'estradosso e di cantiere oppure per estendere successivamente il rilievo anche ai cunicoli laterali e al sistema di raccolta e deflusso dell'acqua.

Nel caso del rilievo di dettaglio, le singole scansioni, inizialmente indipendenti, devono essere allineate al sistema di riferimento comune. L'errore complessivo sarà dato sia dagli errori di misura caratteristici di ciascuno strumento sia dai residui dei calcoli effettuati con metodi statistici; questi valori devono accompagnare il modello in quanto consentono di determinarne l'accuratezza metrica.

Ulteriori parametri di valutazione della qualità di un modello riguardano la completezza di documentazione delle superfici rilevate, valutabile analizzando l'estensione delle lacune residue sul modello o l'entità del 'rumore', ovvero il disturbo delle misure dovuto sia alle caratteristiche intrinseche degli strumenti sia alle proprietà fisiche delle superfici rilevate.

Il passaggio da modello discreto di punti ad un modello di superficie (*mesh*), utilizzato in questo caso per la rappresentazione delle parti in vi-

<sup>11</sup> C. MASTRODICASA *et al.*, *San Carlo Dei Barnabiti: Restoration and Reinforcement of the Roofing of a Florentine Baroque Masterpiece*, conference paper (Florence, 22-24 May 2017), "International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science", XLII-5/W1, 2017, pp. 515-517.

<sup>12</sup> M. KORUMAZ *et al.*, *An integrated Terrestrial Laser Scanner (TLS), Deviation Analysis (DA) and Finite Element (FE) approach for health assessment of historical structures. A minaret case study*, "Engineering Structures", 153, 2017, pp. 224-238.

<sup>13</sup> G. TUCCI, A. CONTI, L. FIORINI, *3-D Survey and Structural Modelling: The Case of the San Giovanni Baptistery in Florence*, in *Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection*, International Conference Proceedings (Nicosia, 29 October-3 November 2018), edited by M. Ioannides *et al.*, vol. 11196, 2018, pp. 271-280.

<sup>14</sup> G. TUCCI, A. CONTI, L. FIORINI, *The Mock-up of the "Ratto Delle Sabine" by Giambologna: Making and Utilization of a 3D Model*, "ICONARP International Journal of Architecture and Planning", 2, 2015, 2, pp. 73-83.

<sup>15</sup> M. SANTANA QUINTERO, *Harnessing digital workflows for conserving historic places*, conference paper (Florence, 22-24 May 2017), "International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science", XLII-5/W1, 2017, pp. 9-14.

<sup>16</sup> La gestione dei metadati delle informazioni geografiche è definita dallo standard ISO19115. Tra le esperienze che negli scorsi anni si sono occupate dei metadati di beni culturali si segnalano i progetti CARARE (M.E. MASCI *et al.*, *3D in the CARARE Project. Providing Europeana with 3D Content for the Archaeological and Architectural Heritage: the Pompeii Case Study*, in VSMM 2012. *Virtual Systems in the Information Society*, International Conference Proceedings (Milan, 2-5 September 2012), edited by G. Guidi, A.C. Addison, 2012, pp. 227-234) e 3D-ICONS (A. D'ANDREA, K. FERNIE, *3D-ICONS Metadata Schema for 3D Objects*, "Newsletter of Archeologia CISA", 4, 2013, pp. 159-181).



Fig. 3 Modello mesh dell'interno della grotta.

<sup>17</sup> Il passaggio da modello discreto di punti a modello di superficie (mesh, cfr. figg. 1, 3), ha richiesto diverse elaborazioni successive: segmentazione e pulitura fino ad ottenere circa 364 milioni di punti; decimazione fino a circa 121 milioni di punti; realizzazione di un modello mesh con l'algoritmo Surface Reconstruction Poisson (circa 60 milioni di facce) a sua volta decimato, al fine di produrre modelli a diverse risoluzioni e conciliare opposte esigenze di risoluzione e maneggevolezza. Il modello mesh complessivo, ad alta risoluzione, della grotta è stato sezionato secondo i piani definiti per ottenere ortomaggini a integrazione delle sezioni (verticali e orizzontali) vettorializzate in proiezioni ortogonali. In casi di minore complessità geometrica questi elaborati sono spesso realizzati con ortofoto ottenute con processo fotogrammetrico; in questo caso, l'uso della mesh (con dati da scansione) si è rivelato particolarmente efficace per garantire una geometria accurata e priva di lacune in una tempistica sostenibile.

sta nelle sezioni verticali e orizzontali, deve conciliare le esigenze opposte di risoluzione e maneggevolezza<sup>17</sup>. In questo caso, il controllo della qualità può essere eseguito verificando che la differenza tra i due modelli (punti e *mesh*) non ecceda i limiti di tolleranza prefissati (figg. 1, 3). Quando, per monitorare le trasformazioni avvenute, si intendono confrontare rilievi eseguiti in periodi diversi di opere che, come le grotte artificiali, sono prive di riferimenti visivi chiaramente individuabili, occorre ricostruire con esattezza la posizione dei piani di sezione utilizzati nei rilievi precedenti e la loro indicazione esclusivamen-

te grafica sui disegni in proiezioni ortogonali può risultare insufficiente. Occorre quindi che la loro giacitura sia annotata anche in forma analitica, ad esempio registrando la traslazione e rotazione dei piani rispetto al sistema di riferimento locale o cartografico adottato.

Se si considera poi che il rilievo è la testimonianza di uno stato di fatto ad una certa data è indispensabile che gli elaborati grafici finali siano pubblicati nella loro interezza, senza privarli di intestazioni, legende, scale metriche, etc. perché gli utilizzatori possano valutarne l'attendibilità e non fraintenderne il contenuto.



### Un modello digitale per la conoscenza e il restauro

Un contributo alla conoscenza della grotta può derivare confrontando<sup>18</sup> il nuovo rilievo con il noto disegno A 1640v conservato presso il Gabinetto dei Disegni e delle Stampe della Galleria degli Uffizi, variamente attribuito a Giovan Battista o a Francesco da Sangallo<sup>19</sup>. Considerata la presenza di cambiamenti dello spessore della muratura, che sembrano alludere a lesene sul perimetro dello spazio interno, era stato ipotizzato che il disegno si riferisse ad una idea progettuale che prevedeva una partizione architettoni-

ca al posto del completo rivestimento rustico poi realizzato. Questa ipotesi ha però trascurato la presenza di un basso zoccolo che segue effettivamente, seppure con tratti di lunghezza inferiore, l'andamento spezzato del perimetro come riportato dal disegno, per cui questo potrebbe rappresentare la struttura grezza antecedente la posa dei "tartari". Rimane da comprendere come mai i tre bracci fossero rappresentati con terminazioni absidate; per questo aspetto potrà risultare utile il completamento del rilievo con l'acquisizione di tutti i corridoi che circondano la grotta. Una peculiarità del rilievo eseguito è che non si

<sup>18</sup> Per la sovrapposizione dei due disegni: tav. 12 Atlante.  
<sup>19</sup> Per la prima attribuzione: Conforti, *La grotta "degli animali"*... cit., per la seconda: G. GALLETTI, *Firenze. loc. Castello. Villa Medicea, grotta degli Animali*, in *Atlante delle grotte e dei ninfei in Italia. Toscana, Lazio, Italia meridionale e isole*, a cura di V. Cazzato, M. Fagiolo, M.A. Giusti, Milano 2001, pp. 45-51. Si veda anche E. FERRETTI, *Acquedotti e fontane del Rinascimento in Toscana*, Firenze 2016, p. 194 e il saggio di Marta Castellini in questo stesso volume.



<sup>20</sup> V. TESI, G. TUCCI, V. BONORA, L. FIORINI, A. CONTI, *Laser scanning and modelling of barely visible features: the survey of the Grotto of the Animals at the Villa of Castello (Florence)*, conference paper (Florence, 22-24 May 2017), “International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science”, XLII-5/W1, 2017, pp. 343-349.

<sup>21</sup> V. TESI, G. TUCCI, V. BONORA, L. FIORINI, A. CONTI, *Il modello digitale di una “macchina idraulica” del ‘500: la Grotta degli Animali della villa medicea di Castello*, atti della conferenza internazionale (Firenze, 22-24 maggio 2017), “Ananke”, numero speciale GeoRes, 2017, pp. 63-68.

è limitato a documentare lo stato degli spazi della grotta degli Animali e delle sue superfici polimeriche, ma è stato aggiornato seguendo le fasi del progetto e del cantiere di restauro per fornire informazioni immediatamente utili ai lavori, ad esempio per verificare lo spessore delle volte o per individuare gli elementi dell'impianto idraulico storico e tentare di ricostruirne la distribuzione<sup>20</sup>. Circa quest'ultimo aspetto, una prima difficoltà concerne proprio la visibilità stessa degli elementi dell'impianto idraulico. Mentre i tratti orizzontali delle condutture in cotto o in piombo portate alla luce all'estradosso sono facilmente riconoscibili nelle scansioni, è difficile individuare i punti da cui si diramano le “canne” che attraversano la volta. Anche lo sbocco delle tubazioni all'intradosso e gli “spilli” che spruzzavano acqua dal pavimento sono appena visibili, sia perché erano intenzionalmente nascosti tra le “spugne” del soffitto e le “frombole” che disegnano il mosaico del pavimento, sia perché l'ossidazione e le incrostazioni di calcare le rendono indistinguibili dalle pietre adiacenti. Per questo motivo si è esclusa l'ipotesi di un rilievo per punti discreti, ad esempio topografico, che avrebbe richiesto di conoscere a priori la posizione degli elementi dell'impianto da rilevare, optando per la scansione laser.

L'attuale grande diffusione delle nuvole di punti dipende in buona parte dalla immediata riconoscibilità di quanto rappresentato, le scansioni sono istintivamente usate come memoria visiva, come se si trattasse di fotografie rafforzate dalla tridimensionalità e dalla misurabilità. Sono sfruttate più raramente ulteriori potenzialità delle nuvole di punti come strumento di indagine, ad esempio per mettere in evidenza aspetti non percepibili a vista o, come in questo caso, per acquisire la posizione nello spazio di oggetti non immediatamente individuabili.

La parte più significativa della progettazione del rilievo della grotta degli Animali è stata finaliz-

zata proprio al superamento di queste criticità<sup>21</sup>. Si è scelto di eseguire un numero di scansioni superiore a quello generalmente sufficiente in spazi di pari dimensioni in modo che, acquisendo le superfici da molti punti di vista, fossero ridotte al minimo le “zone d'ombra” prive di dati tra le spugne (tab. 1). Approfittando anche della presenza di un ponteggio completo, predisposto per la manutenzione della volta, sono state preliminarmente individuate, con un attento esame diretto, tutte le terminazioni delle condutture sul soffitto e sul pavimento della grotta e la loro posizione è stata evidenziata con sfere di polistirolo e ritagli di carta colorata (con colori diversi tra quelle dotate o prive della nappa che diffondeva il getto), in modo che risultassero chiaramente riconoscibili nelle scansioni. Anche all'estradosso le diramazioni delle condutture sono state messe in evidenza con sfere di polistirolo, per evidenziare la corrispondenza tra le parti dell'impianto sulle due superfici della volta e ricostruire l'andamento delle “canne” che la attraversano (fig. 2). All'estradosso, le tubazioni in corrispondenza delle due nicchie laterali e della campata più interna sono disposte pressoché in piano, invece all'intradosso seguono l'andamento della volta e quindi i tratti che attraversano la muratura hanno lunghezza variabile. Queste “cadute” hanno andamento verticale e sono disposte secondo una maglia piuttosto regolare. Il rivestimento della volta è composto da “spugne” di piccole dimensioni che a prima vista sembrano disposte in modo casuale, tuttavia, una volta individuate le tubazioni, si può comprendere che sono state messe in opera in modo da riempire gli spazi tra esse e quindi seguendone l'allineamento. In questo modo è stato possibile ricostruire il percorso dell'impianto in tutta la volta, tranne che nella zona della crociera, dove all'estradosso si trova una rete di tubazioni chiuse a un'estremità e disposte a raggiera (tavv. 19-21 Atlante). In corrispondenza di esse non si trova nessuna nappa

Fig. 4 Modello mesh di un elemento del sistema idraulico all'estradosso della volta (rilievo fotogrammetrico, settembre 2015).

Tab. 1 Dati riepilogativi delle acquisizioni.

all'intradosso, dove la decorazione presenta anzi un disegno del tutto incompatibile, evidenziando quindi un rifacimento successivo. Tra l'altro, le tubazioni a raggiera sono disposte in leggera contropendenza per seguire la curvatura della volta e quindi probabilmente non hanno mai potuto assolvere la loro funzione.

Per un esame più dettagliato delle tubazioni di piombo antiche, è stato eseguito un rilievo fotogrammetrico di alcuni pezzi significativi (fig. 4). In relazione alla funzionalità dell'impianto, si è osservato che i tratti orizzontali dei tubi sono forati nella parte superiore in corrispondenza delle diramazioni dei tratti che attraversano la volta, forse per eliminare eventuali bolle d'aria. Quindi probabilmente era prevista una pavimentazione che consentiva la circolazione dell'aria e forse anche la manutenzione dell'impianto<sup>22</sup>.

Gli “spilli” sul pavimento della grotta sono disposti secondo file longitudinali parallele che suggeriscono il probabile percorso delle tubazioni che sono murate nel pavimento e quindi non ispezionabili. La distanza tra gli ugelli è in qualche caso irregolare per evitare che si trovino in corrispondenza delle lastre di pietra che delimitano i campi dell'imbrecciato, il cui disegno non ha invece relazione con le tubazioni. In riferimento ai documenti che in differenti periodi menzionano la presenza nella grotta di automi, sculture e fontane, si osserva che uno degli spilli si trova sotto la crociera proprio al centro del disegno della pavimentazione, nel punto dove invece ci si potrebbe attendere che fossero collocate tali opere. Nel campo del commesso più vicino all'ingresso della grotta, dove la trama della ghiaia denota un evidente rifacimento, anche gli ugelli sono disposti in modo irregolare, testimoniando una possibile riparazione anche dell'impianto sottostante. Sono attualmente in corso di realizzazione i rilievi dei corridoi di servizio disposti su più livelli intorno e al di sotto della grotta degli Animali (fig. 2), da cui si auspica di ricavare anche in-

<b>Campagne di rilievo</b>	agosto 2012 (Intradosso volta da ponteggio e muro di contenimento) febbraio 2013 (Grotta) ottobre 2013 (Estradosso grotta, test SLAM sui cunicoli) settembre 2015 (Estradosso grotta, progetti fotogrammetrici) dicembre 2017 (Liv. superiore intercapedine) settembre/ottobre 2018 (Liv. inferiore intercapedine, in corso)			
<b>Unità personale</b>	4			
<b>Strumentazione</b>	Stazione totale <i>reflectorless</i> precisione angolare 3” Laser scanner distanziometrico a differenza di fase. Precisione di Posizione* 6 mm con una portata da 1 m a 25 m; 10 mm con una portata fino a 50 m Precisione di Distanza* m4 mm con albedo del 90% fino a 25 m m5 mm con albedo del 18% fino a 25 m m5 mm con albedo del 90% fino a 50 m m6 mm con albedo del 18% fino a 50 m Precisione di angolo (orz./vert.) 125 µrad/125 µrad, Sigma uno *una portata compresa fra 1 m e 50 m, Sigma uno Laser scanner distanziometrico a tempo di volo. Precisione di Posizione *6 mm, Precisione di Distanza * 4 mm, Precisione di Angolo (orz./vert.) 60 µrad / 60 µrad (12” / 12”) *una portata compresa fra 1 m e 50 m, Sigma uno Laser scanner distanziometrico a differenza di fase <i>Linearity error</i> 1 ≤ 1 mm			
	Range noise	black 14 %	grey 37 %	white 80 %
	Range noise, 10 m	0.4 mm rms	0.3 mm rms	0.2 mm rms
	Range noise, 25 m	0.6 mm rms	0.4 mm rms	0.3 mm rms
	Range noise, 50 m	2.2 mm rms	0.8 mm rms	0.5 mm rms
	Range noise, 100 m	10 mm rms	3.3 mm rms	1.6 mm rms
	Camera reflex APS-C			
	Camera reflex <i>Full frame</i>			
	Testa panoramica motorizzata			
<b>Software</b>	Cyclone Leica (elaborazione <i>range maps</i> ) Star*Net (elaborazione dati topografici) Bentley Microstation (CAD) Autodesk Autocad (CAD) ISTL-CNR MeshLab (elaborazioni <i>mesh</i> ) Gigapan Stitch (elaborazione immagini fotografiche)			
<b>Numero Scansioni</b>	22 (agosto 2012) 8 (febbraio 2013) 18 (ottobre 2013) 25 (settembre 2015) 23 (dicembre 2017) 80 (settembre/ottobre 2018)			
<b>Numero di punti totali</b>	370.714.688 (agosto 2012) 369.353.135 (febbraio 2013) 713.732.636 (ottobre 2013) 864.683.723 (settembre 2015) Campagne 2017-2018 in elaborazione			
<b>Risoluzione media</b>	0.005 m a 5 m (agosto 2012 - febbraio 2013) 0.006 m a 10 m (ottobre 2013 - settembre 2015 - settembre/ottobre 2018) 0.12 m a 10 m (dicembre 2017)			

formazioni più dettagliate sulla struttura, gli impianti idraulici e i giochi d'acqua. Le prime indagini stanno fornendo nuove informazioni sulla rete degli scarichi, tra cui tracce di strutture al di sotto dell'ingresso della grotta forse connesse con il meccanismo di chiusura automatica del cancello descritto da Agostino del Riccio<sup>23</sup> e smantellato nel corso degli interventi lorenesei.

<sup>22</sup> Riguardo la descrizione degli impianti della grotta e del giardino: GALLETTI, Firenze. loc. Castello... cit. e L. ZANGHERI, Le “Piante de' condotti” dei giardini di Castello e la Petraia, “Bollettino degli Ingegneri”, XIX, 1971, 2-3, pp. 19-26.

<sup>23</sup> Cfr.: Heikamp, D., Agostino del Riccio, *Del Giardino di un re*. In: *Il giardino storico italiano: problemi di indagine, fonti letterarie e storiche*, atti del convegno di studi, Siena – San Quirico d'Orcia, 6-8 ottobre 1978, Ragionieri, G., (cur.) L. S. Olschki: Firenze 1981.

Questo studio è stato eseguito nell'ambito del progetto GAM-HER project: *Geomatics Data Acquisition and Management for Landscape and Built Heritage in a European Perspective*, PRIN: – Bando 2015, Prot. 2015HJLS7E. La strumentazione utilizzata è stata fornita da NEMECH, Centro di competenza sui beni culturali istituito da Regione Toscana e attivato da MICC-UNIFI.