

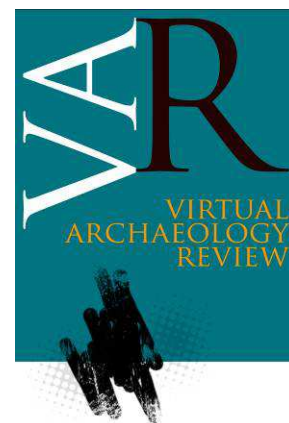
VAR

VIRTUAL ARCHAEOLOGY REVIEW



*VOLUMEN 4
NÚMERO 8
MAYO 2013*

ISSN 1989-9947



ISSN 1989-9947

EQUIPO EDITORIAL EDITORIAL TEAM

Directores / Directors

Alfredo Grande

INNOVA CENTER. European Center for Innovation in Virtual Archaeology. Sevilla. Spain.

Víctor Manuel López-Menchero Bendicho

INNOVA CENTER. European Center for Innovation in Virtual Archaeology. Sevilla. Spain.

Secretarios / Secretaries

Mariano Flores Gutiérrez

Universidad de Murcia. Murcia. Spain

M^a Angeles Hernández-Barahona Palma

INNOVA CENTER. European Center for Innovation in Virtual Archaeology. Sevilla. Spain.

Consejo de Redacción / Editorial Board

Maurizio Forte

School of Social Sciences, Humanities and Arts. University of California, Merced. USA

Bernard Frischer

IATH. Institute for Advanced Technology in the Humanities. University of Virginia. USA

Juan Antonio Barceló

UAB. Universidad Autònoma de Barcelona. Spain

Mario Santana Quintero

Universidad de Carleton. Canada

Robert Vernieux

Grupo AUSONIUS. Bordeaux. France

Marinos Ioannides

National Committee for the Digitalisation and e-Preservation at Ministry of Education and Culture Cyprus. Cyprus

Michael Ashley

CHI. Cultural Heritage Imaging. USA

Daniel Pletinckx

Visual Dimension bvba, Ename, Belgium

Hugh Denard

King's Visualisation Lab. King's College London., UK

Roberto Scopigno

CNR ISTI. Pisa. Italy

Eva Pietroni

CNR Institute of Technologies Applied to Cultural Heritage. Rome, Italy

Earl Graeme

University of Southampton. UK

Jim Shang

Beijing Tsinghua Urban Planning & Design Institute. Beijing. China

José Luis Lerma

GIFLE. Universidad Politécnica de Valencia. Spain

Jorge Onrubia Pintado

LAPTE. Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real. Spain

Francisco Seron

GIGA. Advanced Computer Graphics Group. University of Zaragoza. Spain

Luis A. Hernández Ibáñez

VIDEA LAB. Universidade a Coruña. A Coruña. Spain.

Juan Carlos Torres

GIIG, Universidad de Granada. Granada. Spain.

Edita/ Edit



INNOVA Centers in Spain:

European Center for Innovation in Virtual Archaeology
INNOVA CENTER
Sevilla

Centro de Estudios de Arqueología Virtual
digitalMED
Murcia

Laboratorio de Arqueología, Patrimonio
y Tecnologías Emergentes
LAPTE
Ciudad Real

Colaboradores/ Collaborators



Rilievo e ricostruzione virtuale del Ponte Sud di Hierapolis di Frigia (Turchia)

Giacomo Di Giacomo¹, Massimo Limoncelli² e Giuseppe Scardozzi¹

¹ Consiglio Nazionale delle Ricerche. Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali, Lecce. Italia

² Scuola di Specializzazione in Archeologia Classica e Medievale. Università del Salento, Lecce. Italia

Resumen

El artículo se refiere al levantamiento topográfico y la reconstrucción en 3D de un puente-acueducto romano situado inmediatamente al sur de Hierápolis, en Frigia (suroeste de Turquía), a lo largo del antiguo camino dirigido a Colosas, en el interior de Anatolia. Actualmente sólo se conservan su pilar sur y escasos restos del pilar norte. Se encuentra en una situación muy difícil, en el interior de un valle estrecho y profundo, y nunca se ha estudiado antes. Durante la campaña de trabajo de campo de 2011 de la Misión Arqueológica Italiana, fue examinado con un diferencial de alta precisión del sistema GPS (para la documentación del plan y su posicionamiento en el mapa digital arqueológico de Hierápolis) y a través de una estación total robótica motorizada (para la documentación de la elevación y la creación de un modelo 3D de la cara sur) con el objetivo de su reconstrucción virtual.

Palabras Clave: PUENTE-ACUEDUCTO, ESTACIÓN TOTAL Y GPS ENCUESTAS, RECONSTRUCCIÓN 3D, HIERÁPOLIS DE FRIGIA

Abstract

The paper concerns the topographical survey and the 3D reconstruction of a Roman bridge-aqueduct located immediately to the south of Hierapolis in Phrygia (south-western Turkey), along the ancient route directed to Colosse and the internal Anatolia; only its southern abutment and scarce remains of the northern one are preserved. It is in a very difficult location, inside the narrow and deep valley, and it was never studied before. During the 2011 field work campaign of the Italian Archaeological Mission, it was surveyed using a high precision differential GPS system (for the plan documentation and its positioning in the digital archaeological map of Hierapolis) and through a Motorized Robotic Total Station (for the documentation of the elevation and the creation of a 3D model of the southern side) with the aim of its virtual reconstruction.

Key words: BRIDGE-AQUEDUCT, TOTAL STATION AND GPS SURVEYS, 3D RECONSTRUCTION, HIERAPOLIS OF PHRYGLA

1. Il Ponte Sud: dal rilievo alla ricostruzione virtuale

Il cosiddetto Ponte Sud di Hierapolis di Frigia (Pamukkale, provincia di Denizli, Turchia sud-occidentale) si trova circa 200 m a sud del limite meridionale dell'area urbana (D'ANDRIA, SCARDOZZI, SPANÒ, 2008: 147); i suoi resti si conservano all'interno di una profonda valle scavata da un corso d'acqua in secca nella stagione estiva (fig. 1). Il ponte fu costruito lungo il tracciato che costituiva la prosecuzione extraurbana della *plateia* della città, ovvero dell'asse stradale principale che attraversava Hierapolis in senso nord-ovest/sud-est e su cui era impostato tutto l'impianto urbano. All'estremità sud-orientale della *plateia*, il limite della città era segnato da una porta monumentale a tre forni, probabilmente realizzata dal proconsole d'Asia (84-85 d.C.) Sesto Giulio Frontino, al pari di quella più famosa posta all'estremità nord-occidentale della stessa strada. La porta, i cui resti sono ancora in parte interrati, era fiancheggiata da due torri quadrate (D'ANDRIA, SCARDOZZI, SPANÒ, 2008: 143) e fu costruita quasi sul ciglio meridionale del terrazzo di travertino su cui sorge la città; da questo punto il terreno scende progressivamente e ripidamente verso sud e la strada che usciva

dalla porta correva su una linea di crinale. Il tracciato era fiancheggiato ad ovest da un canale, che nel corso dei secoli, anche dopo l'abbandono della strada, si è accresciuto notevolmente a causa dei continui apporti di acqua calcarea, invadendo e coprendo l'asse viario con grandi concrezioni; si tratta di uno dei canali ricordati da Strabone (XIII, 4, 14) e Vitruvio (VIII, 3), costruiti per portare l'acqua, che sgorgava dalle sorgenti termali poste sul terrazzo della città, nei campi situati al di sotto di esso, verso nord, ovest e sud. La spettacolare formazione calcarea raggiunge oggi un'altezza di 8-10 m e dalla sede originaria si è allargata ricoprendo quasi tutto il tracciato antico; con la sua forma ad "esse" caratterizza il paesaggio a sud della città (fig. 2).

Dopo un percorso di circa 320 m, la strada, che proseguiva la *plateia* in direzione della vicina città di Colosse e dell'Anatolia centrale, raggiungeva il ciglio settentrionale della profonda valle che segna il limite meridionale del sito su cui si estendono Hierapolis e le circostanti necropoli. Il Ponte Sud, probabilmente risalente alla prima età imperiale romana, ma su cui sono visibili segni di interventi anche successivi, permetteva sia alla strada che al canale di superare la stretta e profonda depressione in cui scorre un corso d'acqua stagionale (il Kadi Dere); si tratta pertanto di un ponte-acquedotto, di cui si conservano solo la spalla meridionale e scarsi resti di quella settentrionale, mentre

alcuni grandi frammenti, recanti anche resti della pavimentazione stradale a grandi lastre di travertino (misure esemplificative: lungh. cm 180-190, largh. 110-115 e spess. 25-35), sono in crollo nel fondovalle (figg. 3-4).

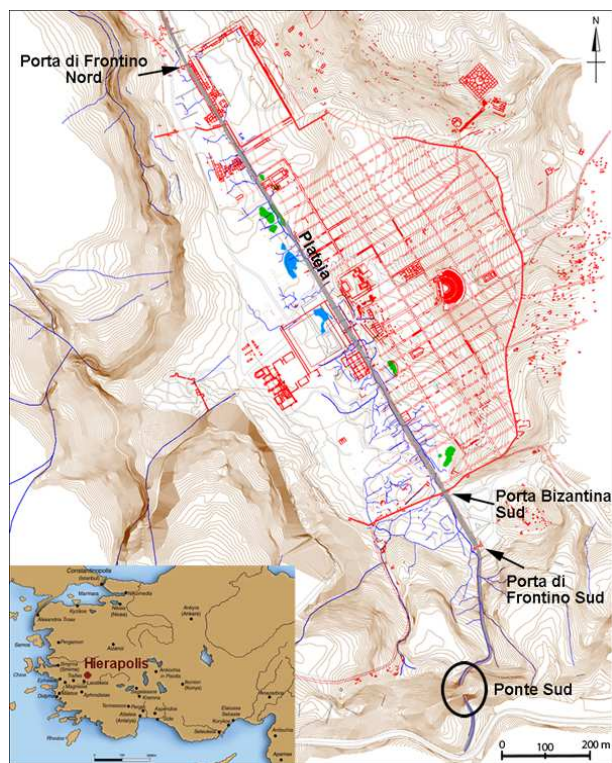


Fig. 1. Localizzazione del Ponte Sud di Hierapolis: in grigio la strada che lo attraversava ed in blu i canali..



Fig. 2. Veduta generale dei resti del ponte-acquedotto: A, canale di calcare; B, spalla nord; C, spalla sud.

Il Ponte Sud è rimasto privo di uno studio approfondito fino al 2011, quando è stato oggetto di un'indagine sistematica condotta dai ricercatori dell'Istituto per i Beni Archeologici e Monumentali (Consiglio Nazionale delle Ricerche) e dell'Università del Salento, che, nell'ambito delle attività della Missione Archeologica Italiana a Hierapolis di Frigia, hanno proceduto al rilievo ed alla documentazione del monumento. In particolare, con un sistema GPS differenziale è stata realizzata la

pianta delle strutture ancora conservate, al fine di inserire il ponte nella carta archeologica digitale della città; si è poi proceduto alla documentazione dei prospetti della spalla meridionale con l'impiego di una stazione totale robotizzata e motorizzata.



Fig. 3. I resti del ponte-acquedotto da est: sono indicati i resti del canale (A) e del lastricato stradale (B) in situ e le porzioni dell'arcata superiore (C) e della spalla settentrionale (D) franati nel fondovalle.



Fig. 4. La spalla sud: A, lastricato stradale; B, canale.

La spalla meridionale del ponte poggia direttamente sul banco roccioso, regolarizzato, ed ha un'altezza di circa 20 m; è costituita da un nucleo in cementizio rivestito da grandi blocchi parallelepipedi di travertino (circa cm 50 x 60 x 120-200) messi in opera con poca malta, nel prospetto settentrionale, e da

blocchetti in calcare di dimensioni minori (circa cm 25 x 35 x 30), legati da molta malta, sui lati ovest ed est. Il ponte presentava due arcate sovrapposte, che permettevano di superare il dirupo molto profondo, mantenendo in quota la strada e soprattutto il canale; si conservano solo alcuni conci delle imposte dei due archi, entrambi estradossati a corona semicircolare di cunei. Le arcate poggiano su mensole poste alla sommità di piedritti di diverse dimensioni: quello inferiore, con paramento a grandi blocchi, bugnati sui fianchi est ed ovest, è largo m 8,35 ed alto circa 2,80, mentre quello superiore, caratterizzato anch'esso nella faccia settentrionale da un paramento con blocchi bugnati a superficie rustica, è largo m 6,70 ed alto 3,60. Si tratta quindi di una struttura a due ordini sovrapposti, rientranti l'uno sull'altro dal basso verso l'alto, generalmente impiegata in presenza di dirupi molto profondi, che pur avendo come primaria funzione quella di viadotto, mostra soluzioni costruttive tipiche degli acquedotti.

La strada che passava sopra il ponte doveva avere una larghezza di circa 4 m ed era fiancheggiata ad est da un parapetto, che, come in altri ponti, possiamo verosimilmente immaginare largo cm 40-50 ed alto circa 90, e ad ovest da un canale. Questo sul ponte sembra presentare una copertura ad ogiva; è alto circa 3 m e largo 2,30 ed è realizzato in basso con lastre di travertino (lunghezza cm 1,85-1,90, altezza 1,10, spessore 40) e superiormente con blocchetti sempre di calcare (lo speco è largo 1 m ed alto 2,50). Il canale è visibile soprattutto sulla spalla meridionale (fig. 4), dove si presenta in gran parte coperto da formazioni calcaree (che si sono progressivamente accresciute fino ad un'altezza di 4,20 m e coprono anche parte dei lati est e soprattutto ovest della spalla del ponte), mentre un breve segmento si conserva anche tra gli scarsi resti della spalla settentrionale, insieme a lacerti del lastricato, anch'essi inglobati nel calcare (fig. 5). Su questo versante della valle si conservano anche un muro d'ala ad ovest della spalla e tratti di muri di contenimento a valle della strada.



Fig. 5. I resti della strada a nord del ponte inglobati nel calcare: A, lastricato; B, muro di costruzione.

Lo studio di dettaglio di questo ponte-acquedotto ne ha confermato la datazione alla prima età imperiale; sebbene il tracciato su cui si trova esistesse già in epoca ellenistica, la sua completa ristrutturazione risale ad epoca flavia, subito dopo il terremoto che colpì Hierapolis nel 60 d.C., quando venne realizzata anche la già ricordata porta monumentale posta appena 300 m più a nord-est, aperta lungo lo stesso asse stradale; forse proprio in questo momento venne realizzato anche il ponte-acquedotto e non si può non evidenziare come la ristrutturazione della città dopo il sisma neroniano sia stata coordinata da quel Sesto Giulio Frontino, come già detto

proconsole d'Asia nell'84-85 d.C., che nel 97 d.C. sarà nominato *curator aquarum* di Roma, ovvero responsabile degli acquedotti e dei servizi collegati, e che sarà autore del *De aquis urbis Romae*, opera dedicata all'approvvigionamento idrico della città.

È però anche possibile che il ponte di Hierapolis fosse più antico, magari di epoca augustea (quando si ha un'estesa monumentalizzazione della città), come suggeriscono anche i confronti (v. *infra*), ed essere stato ristrutturato in epoca flavia. Deve poi essere rimasto in uso per molti secoli, almeno fino all'epoca proto-bizantina, quando nel punto in cui la *plateia* usciva dalle mura urbane venne eretta una nuova porta monumentale, più arretrata rispetto alla precedente; probabilmente il monumento subì interventi di restauro (magari successivi al terremoto che colpì Hierapolis poco dopo la metà del IV sec. d.C.), come alcune risarciture in blocchetti che si riscontrano nei paramenti est ed ovest della spalla sud. Le incrostazioni di calcare evidenti lungo l'intradosso dell'arcata superiore della spalla sud documentano un evento di mancata regolamentazione dell'acqua che scorreva nel canale (forse danneggiato), che per un breve periodo sembra aver tracimato anche a sud del ponte, dove venne convogliata in un canale più ridotto, prima che il monumento crollasse, forse a seguito del terremoto che colpì la città alla metà del VII sec. d.C. segnandone il definitivo declino.



Fig. 6. Ricostruzione 3D del Ponte Sud: vista da est.

Le operazioni di rilievo della campagna 2011 hanno costituito la base per lo studio ricostruttivo del monumento; alla ricostruzione virtuale, che consente di apprezzarne la volumetria e le caratteristiche costruttive, si è anche aggiunta la ricostruzione tridimensionale della valle oltrepassata dal ponte, basata su un DEM ottenuto a partire da una stereocoppia acquisita dal satellite Ikonos-2 nel 2004, con massima risoluzione geometrica al suolo di 1 m. Considerando la curvatura delle porzioni di arco conservate *in situ*, i grandi frammenti in crollo e la larghezza del fondovalle, è possibile ipotizzare che l'arcata inferiore fosse a tutto sesto ed avesse un'ampiezza di circa m 8,70 (fig. 6); su di esso, in corrispondenza della chiave, doveva poggiare un pilastro largo circa 1,90 m che separava due archi affiancati sempre a tutto sesto, con luci di circa 4,90 m. Si tratta di una soluzione costruttiva non canonica, poiché nei ponti con arcate ad ordini sovrapposti, sia di viadotti che di acquedotti, si preferiva in genere realizzare i piedritti superiori in corrispondenza di quelli inferiori; essa si ritrova comunque nel famoso Pont du Gard, presso Nîmes, in Francia, datato agli ultimi due decenni del I sec. a.C., che presenta anch'esso, nel terzo ordine, quattro arcate costruite in corrispondenza dell'arcata centrale del secondo ordine, con piedritti realizzati in corrispondenza della chiave e delle reni dell'arco sottostante. Il monumento di Hierapolis trova un confronto molto stretto nel ponte-acquedotto di *C. Sextilius Pollio*

della vicina Efeso, costruito tra il 4 ed il 14 d.C., che, sebbene più lungo, presenta simili dimensioni delle due arcate sovrapposte ed identiche soluzioni costruttive (WIPLINGER, 2006: 23-25): arcate realizzate in blocchi parallelepipedi e spalle in blocchetti; due arcate nel secondo ordine costruite in corrispondenza di una del primo, con piedritto dell'arco superiore poggiante sulla chiave di quello inferiore.

Nel ponte di Hierapolis, le due arcate sovrapposte davano saldezza e stabilità alla struttura e permettevano di superare una valle molto profonda, stretta in basso e più larga in alto, mantenendo in quota la strada e soprattutto l'acquedotto; l'arco inferiore consentiva di oltrepassare l'alveo del corso d'acqua (senza costruire un pilone al suo interno) e, allo stesso tempo, permetteva la costruzione dei due archi posti al di sopra di esso, necessari per superare una luce di quasi 11,5 m; la struttura della spalla settentrionale è praticamente del tutto distrutta e, a giudicare dagli strati sabbiosi ed argillosi che affiorano su questo lato del fondovalle, è verosimile che il sottosuolo su cui poggiava fosse meno solido del versante opposto. [G.S.]

2. Il rilievo

Il rilievo delle strutture conservate del Ponte Sud di Hierapolis si è rivelato molto impegnativo sia da un punto di vista tecnico, per la necessità di effettuare il rilievo direttamente in coordinate reali, sia da un punto di vista logistico, per la difficoltà riscontrata nell'istituire punti di rilievo in zone difficili da raggiungere, impervie ed impegnative per la messa in stazione degli strumenti. Le operazioni sul campo sono iniziate con l'istituzione di nuovi *survey points* generati a partire dalla rete topografica esistente nella città antica, utilizzando un GPS differenziale di alta precisione, impiegato anche per la pianta ed il posizionamento delle strutture archeologiche ancora conservate (fig. 7); le coordinate assolute di tali punti erano necessarie per ottenere un rilievo coerente con la carta archeologica digitale di Hierapolis. Si sono quindi misurati due nuovi punti topografici a ridosso del ciglio settentrionale della stretta valle anticamente oltrepassata dal ponte, mentre un terzo punto è stato acquisito a sud della spalla meridionale, in modo da includere il monumento all'interno di un triangolo agganciato saldamente alla rete topografica principale della città.

I due vertici settentrionali del triangolo, sono stati quindi utilizzati come *survey points* per il rilievo con stazione totale robotizzata e motorizzata, che è stata utilizzata in modalità *reflectorless*, grazie al dispositivo laser integrato, per i prospetti della spalla sud del ponte. La precisione angolare della stazione utilizzata è di 1 mgon, mentre le prestazioni del laser certificate dalla casa costruttrice sono pari a $(3 + 2 \text{ ppm} \times D) \text{ mm}$, su una distanza fino a 200 m. Facendo stazione sul vertice nord-orientale del triangolo, sono stati definiti i vertici del parallelogramma che include le facciate est e nord della spalla meridionale; si è impostata quindi la scansione al passo orizzontale e verticale di 10 cm, configurando un ciclo reiterativo di 3 tentativi di misura sui punti poco definiti. La stazione totale ha così acquisito una nuvola di punti tridimensionali in coordinate assolute dal primo punto di rilievo; con le stesse modalità ed impostazioni, si è provveduto ad effettuare una nuova scansione facendo stazione, questa volta, sul vertice nord-occidentale del triangolo, documentando così la facciata ovest e di nuovo quella nord della spalla meridionale.

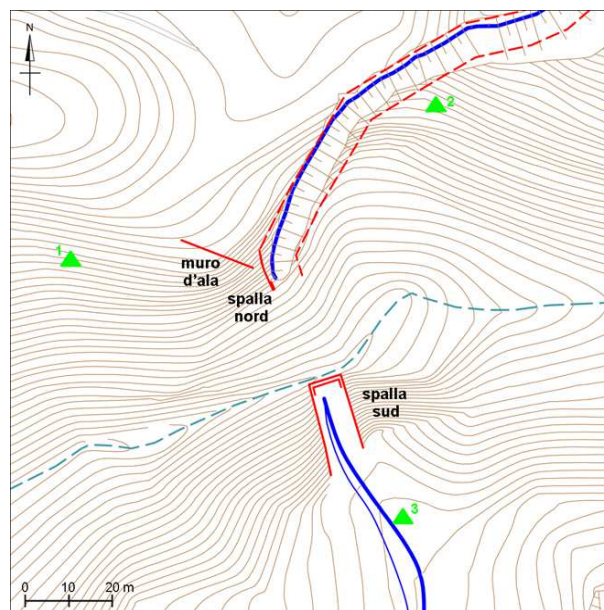


Fig. 7. Planimetria dei resti del Ponte Sud nella carta archeologica di Hierapolis; in verde i punti topografici.

Le due nuvole di punti, rilevate direttamente in coordinate reali, sono state processate con il software in dotazione allo strumento in modo da ottenerne il *merging* e l'eliminazione automatica dei punti troppo vicini o di quelli rilevati più volte, generando in uscita una nuvola unica già in parte "ripulita". I punti sono quindi stati analizzati direttamente, attraverso altri software CAD, e si è provveduto a eliminare, questa volta, i punti relativi ad interferenze, quali alberi, grosse pietre o arbusti localizzati nelle vicinanze del monumento, soprattutto in prossimità della base della spalla, nel letto del corso d'acqua. È stato così ottenuto un modello tridimensionale della spalla meridionale del ponte, utilizzato per la ricostruzione virtuale.

Infine, il DEM della valle è stato realizzato a partire da curve di livello, con equidistanza di 1 m, estratte da una stereocoppia satellitare attraverso un algoritmo di comparazione delle immagini; su queste, opportunamente ortorettificate, sono stati identificati i punti omologhi e si è quindi provveduto ad estrarre il piano quotato. [G.D.G.]

3. La ricostruzione virtuale

Partendo dal rilievo delle murature del ponte ancora *in situ*, dall'analisi delle sue strutture rinvenute in crollo lungo l'alveo del corso d'acqua e dallo studio dei resti ancora visibili dell'antica strada si è proceduto innanzitutto ad una restituzione su base bidimensionale dei prospetti e della sezione del ponte. Tale operazione ha consentito in primo luogo una verifica del rapporto tra il rilievo architettonico del monumento ed il rilievo topografico dell'area e, in secondo luogo, ha posto le basi per una prima ipotesi di ricostruzione virtuale. Utilizzando la stessa stazione totale impiegata per la scansione, la cui maglia di 10 cm x 10 cm ha consentito una buona restituzione sia della spalla meridionale del ponte che dell'area adiacente, sono stati individuati ed acquisiti i cosiddetti punti di "discontinuità" o punti "notevoli" delle strutture al fine di creare una maglia in *nirframe* necessaria sia per

ottenere dei foto-raddrizzamenti che per una preliminare restituzione 3D della spalla sud.

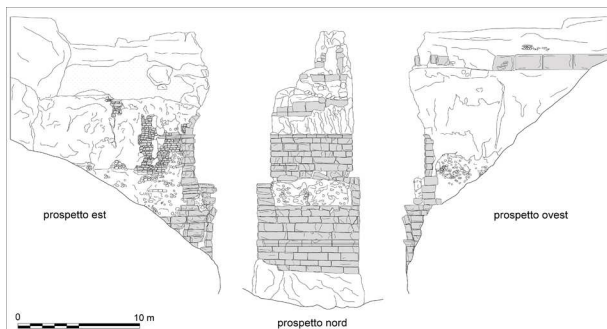


Fig. 8. Rilievo della spalla meridionale.

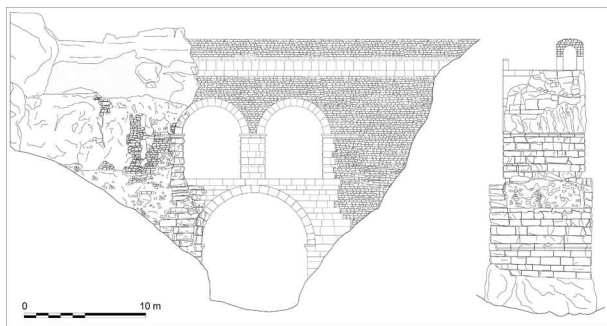
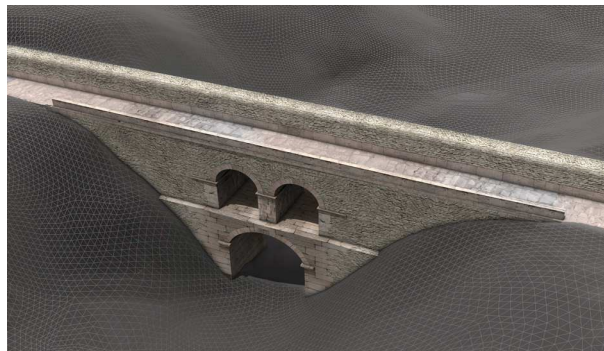


Fig. 9. Ricostruzione del prospetto est e della parte superiore della spalla sud del ponte-acquedotto.

Attraverso la digitalizzazione dei foto-raddrizzamenti, si è quindi proceduto alla realizzazione dei prospetti generali est, ovest e nord della spalla meridionale (fig. 8) dai quali è stata ottenuta la ricostruzione 2D del monumento (fig. 9). Successivamente è stata eseguita la restituzione 3D del ponte attraverso le differenti tecniche di *Hand Made Modelling* (Poligonale, NURBS, Subdivision

Surface, ecc.). Il modello ottenuto è composto complessivamente da 187 oggetti per un totale di 950.000 poligoni. La mappatura del modello ha previsto l'utilizzo di texture ad alta risoluzione ricavate dai foto-raddrizzamenti precedentemente realizzati e da un campionamento fotografico eseguito in loco di tutte le superfici visibili delle strutture.



Figg. 10-11. Ricostruzioni 3D del ponte-acquedotto e della valle del Kadi Dere (in basso: con ipotesi di arcate completamente a blocchi); veduta da nord-est.

Infine, sono stati realizzati alcuni *rendering* ad alta risoluzione (3000 per 2000 dpi) nei quali il ponte, mediante fotomontaggi, è stato inserito sia all'interno del contesto attuale che in quello originario, ricostruito mediante il DEM realizzato a partire da dati telerilevati da satellite (figg. 10-11). [M.L.]

Ringraziamenti

Le ricerche sul Ponte Sud di Hierapolis sono state possibili grazie all'incoraggiamento ed al costante supporto del Prof. F. D'Andria, direttore della Missione Archeologica Italiana. Al rilievo ed allo studio del monumento hanno collaborato anche le Dott.sse Imma Ditaranto ed Ilaria Miccoli

Referimenti bibliografici

D'ANDRIA, Francesco, SCARDOZZI, Giuseppe, SPANÒ, Antonia (2008): *Atlante di Hierapolis di Frigia*, Ege Yayınları, Istanbul.

WIPLINGER, Gilbert (2006): *Wasser für Ephesos. Stand der Erforschung der Wasserversorgung*, in *Cura Aquarum in Ephesus, I*, Peeters, Leuven - Paris - Dudley, pp. 23-37.

VAR

VIRTUAL ARCHAEOLOGY REVIEW



DIRECTORES / DIRECTORS

ALFREDO GRANDE LEÓN

VÍCTOR MANUEL LÓPEZ-MENCHERO BENDICHO