

Dal CAD al GIS: criticità nel riuso di legacy data archeologici

Andrea D'Andrea
Università di Napoli "L'Orientale"
dandrea@unior.it

Abstract

Da alcuni decenni gli archeologi creano direttamente planimetrie digitali in CAD o GIS. Questo approccio ha rivoluzionato la registrazione dei dati spaziali. Anche se le mappe registrate in CAD o GIS condividono una modalità comune di rappresentazione numerica organizzata in strati, la differenza tra i due sistemi risiede nell'associazione tra la geometria e le informazioni alfanumeriche a essa collegate e nella topologia. Pertanto, il riutilizzo dei dati CAD nei GIS non è un compito facile senza una riorganizzazione delle informazioni basata sulla costruzione di oggetti semantici, corrispondenti alle caratteristiche archeologiche reali. Molti strumenti sono stati sviluppati con l'obiettivo di convertire automaticamente i file CAD in formati GIS; ma, nonostante gli sforzi, i risultati fin qui ottenuti sono scarsamente significativi e la sfida è ancora aperta. Senza l'intervento diretto del ricercatore, questo passaggio rischia di generare dati incongruenti. Partendo da queste premesse, l'articolo esamina l'approccio seguito per organizzare e convertire le risorse cartografiche relative al sito di al-Balīd nel Sultanato dell'Oman. L'obiettivo è fornire una cornice metodologica per ancorare le strutture archeologiche esistenti e proporre un flusso di lavoro in grado di convertire i disegni CAD in file GIS.

Keywords

Archaeological maps, Legacy Data, Spatial Archive, Migration CAD to GIS

In uno dei primi articoli dedicati all'impiego del GIS in archeologia, K. Kvamme (1989, p. 139) ha sottolineato la tendenza degli archeologi che lavorano sui record spaziali "ad adottare mezzi informatici automatizzati, o sistemi di gestione di database, per fare un uso efficiente ed efficace di questi grandi insiemi di dati". L'uso pionieristico dei database per archiviare ed elaborare consistenti quantità di record alfanumerici nel tempo è stato progressivamente sostituito e integrato dall'impiego dei GIS in grado di gestire non soltanto attributi testuali, ma anche di visualizzare e interrogare oggetti a connotazione spaziale. L'esigenza di creare piante tematiche (cronologiche, funzionali, distributive) ha spinto i ricercatori a utilizzare una tecnologia di seconda mano, cioè messa a punto prioritariamente per altri compiti (Beale, Reilly 2017), con l'obiettivo di indagare modelli insediativi a livello territoriale anche ricorrendo a fonti non archeologiche come le immagini satellitari, le piante geologiche e geomorfologiche. Una delle principali caratteristiche del GIS risiedeva nella possibilità, fornita dalla comune cornice geografica delle fonti, di combinare in un unico ambiente di esplorazione e analisi strati informativi di natura e contenuto differente come per esempio l'idrografia, l'uso del suolo e/o gli attuali confini amministrativi.

Più o meno negli stessi anni si diffondeva in campo archeologico la tecnologia CAD orientata a supportare il ricercatore nella costruzione di accurate planimetrie in scala e nella gestione grafica di rilievi di scavo, di strutture e di monumenti che potevano periodicamente essere aggiornati e successivamente pubblicati (Beex 1994; Messika 1996). I disegni CAD venivano utilizzati per localizzare le trincee di scavo ed eventuali sondaggi, nonché le singole evidenze riportate alla luce, fornendo in tal modo una mappa completa e geometricamente accurata dell'area indagata. L'impiego di punti topografici, acquisiti con la stazione totale, consentiva di precisare il posizionamento dello scavo all'interno di un più ampio contesto territoriale che poteva contenere anche informazioni connesse all'assetto dell'ambiente moderno (Alperscon-Afil 2019). All'obiettivo di individuare su una mappa qualsiasi informazione archeologica emersa durante le indagini sul terreno si aggiungeva l'esigenza di posizionare i rinvenimenti in un ambito non confinato esclusivamente al paesaggio antico. Consistenti risparmi di tempo nell'adeguamento dell'informazione archeologica spaziale e nella estrazione di specifiche proiezioni (prospetti, sezioni) compensavano alcuni limiti nell'uso delle piante CAD non ancora riproducibili a colori. Inoltre, per la prima volta, gli archeologi potevano esplorare una documentazione tridimensionale e riflettere su ricostruzioni architettoniche o pattern distributivi dei rinvenimenti (Reilly 1991), mentre le mappe numeriche, codificate in vettori CAD, consentivano di eseguire anche complessi calcoli statistici sugli insiemi spaziali. Per alcuni anni il CAD è sembrato un sistema risolutivo per la registrazione digitale dei dati di scavo; l'assenza di strumenti per la memorizzazione di informazioni descrittive era bilanciata dall'implementazione di specifici software in grado di generare un link tra i due dataset, quello spaziale e quello alfanumerico.

Da un punto di vista cartografico le applicazioni CAD e GIS non sono dissimili (Newell, Sancha 1990): entrambe sono utilizzate per creare disegni che possono essere strutturati in forma di livelli informativi distinti o accorpati in base alle esigenze della ricerca. Per alcuni anni il dibattito in ambito archeologico è apparso concentrato sulle forme di integrazione tra i due sistemi, spingendo soprattutto per l'impiego del CAD collegato ad applicativi destinati alla registrazione di dati associabili agli elementi grafici. Beex (1994, in part. nota 11) sostenendo la superiorità del CAD rispetto al GIS, sottolineava l'abilità del CAD di gestire l'informazione parziale, inaccurata o fuzzy senza forzature, mentre il GIS richiedeva il disegno di oggetti grafici ben definiti e identificabili spazialmente.

Nonostante il comune principio della codifica vettoriale, la migrazione dei disegni da e verso CAD-GIS richiede una concettualizzazione specifica che rende impossibile l'implementazione di una conversione automatica tra i sistemi. Sebbene le industrie del settore delle tecnologie spaziali abbiano sviluppato soluzioni con l'obiettivo di integrare e rendere facilmente interoperabili i due sistemi, i dati GIS e CAD non sono ancora perfettamente sovrapponibili, non tanto in termini di relazioni spaziali tra le informazioni grafiche quanto piuttosto in riferimento alla natura semantica che gli oggetti digitali intendono rappresentare sul piano della conoscenza archeologica. Se l'evoluzione degli strumenti informatici rende possibile la raccolta, l'archiviazione, l'interrogazione, l'elaborazione e la visualizzazione di dati spaziali con sempre maggiore efficienza, questo approccio ha progressivamente cambiato l'atteggiamento dell'archeologo di fronte alla scrittura e alla gestione dei dati spaziali, modificando le modalità di registrazione e presentazione delle informazioni a livello di sito o di paesaggio.

Purtroppo, nonostante gli sforzi compiuti nella direzione della creazione di formati digitali di interscambio tra sistemi diversi, l'adattamento di file CAD per applicazioni GIS è ancora un compito difficile, impossibile da portare a termine senza l'intervento umano (Bibby, Ducke 2017). Sebbene le mappe codificate per applicazioni CAD o GIS condividano una modalità comune di rappresentazione numerica organizzata in strati, la differenza tra i due sistemi risiede nel legame tra le entità geometriche

e le informazioni alfanumeriche a esse collegate; in particolare, il CAD produce mappe grafiche complesse spesso accurate nell'ordine di millimetri, ma ignora gli attributi non spaziali associati alle entità grafiche e soprattutto la topologia, cioè la relazione tra le geometrie vettoriali. Pertanto, il riutilizzo dei dati CAD nei GIS non è un compito facile senza una riorganizzazione delle informazioni che si fondi sulla costruzione di oggetti in grado di trasformare le primitive geometriche CAD in record semantici (muri, stanze, strade, edifici, ecc.). Inoltre, i software GIS permettono di integrare più facilmente i dati archeologici con altre fonti spaziali, come le immagini satellitari, gli strati relativi al paesaggio moderno, alla topografia antica, alla geologia, ecc., fornendo in questo modo un quadro più dettagliato per l'analisi del paesaggio e dei modelli di occupazione dello spazio nell'antichità.

Partendo da queste premesse, l'articolo mostra, come esempio di criticità connesse al passaggio CAD-GIS, il processo di trasformazione progettato per convertire le risorse cartografiche, originariamente in CAD, relative al sito islamico di al-Balīd, nel Sultanato dell'Oman, che fu uno dei porti più importanti dell'Oceano Indiano occidentale tra il XIII e il XVII secolo. L'intervento descritto nel contributo si intreccia anche con le più generali questioni relative all'aggiornamento dei *legacy data*, cioè i dati ereditati, talvolta digitali, che costituiscono una preziosa e spesso insostituibile fonte informativa riutilizzabile per nuove ricerche in campo topografico.

Il processo di digitalizzazione

La conversione digitale di mappe e disegni storici viene realizzata seguendo due strategie che possono essere integrate: tramite la scansione o la vettorializzazione delle informazioni spaziali contenute in mappe, sezioni, prospetti e anche in fotografie. La digitalizzazione è un compito relativamente facile. In genere, le planimetrie 2D vengono scansionate in formato raster, ridimensionate alla scala originale e quindi disegnate con un software di disegno vettoriale. La fase di disegno, volta a catturare le caratteristiche archeologiche, topografiche e geologiche, della mappa si basa sulle esigenze di ricerca e/o professionali dell'utente finale. In CAD i vettori (linee, poligoni, polilinee, punti) sono assegnati a layer che identificano diversi attributi. Sebbene sia facile aggiornare una mappa CAD, non è possibile associare attributi alfanumerici all'oggetto vettoriale, né interrogarlo o raggrupparlo in diversi elementi che condividano caratteristiche comuni come la cronologia, la tipologia, la fase, etc. Ulteriori criticità emergono quando la vettorializzazione, per quanto accurata, non è in grado di rappresentare una serie di informazioni descrittive, che non possono essere estratte dalla documentazione grafica esistente, ma che risultano indispensabili per una corretta interpretazione dell'oggetto disegnato. L'uso delle etichette testuali per caratterizzare l'informazione spaziale o di altri elementi relativi alle proprietà della resa grafica (spessore, tipologia, colore, stile, retini, etc.) può certamente aiutare la lettura del prodotto finale, ma non consentono di rendere la mappa interrogabile. Il passaggio, dunque, dai disegni CAD ai sistemi GIS rappresenta una sfida di non facile soluzione, che solo parzialmente può avvalersi di strumenti automatici.

Uno dei punti di maggiore problematicità riguarda il processo non solo di conversione, ma anche di creazione di oggetti. A differenza del disegno CAD, nel quale le linee sono utilizzate per rappresentare molteplici informazioni, i sistemi GIS lavorano su oggetti discreti, cioè legati a una superficie definita (chiusa o aperta) a cui viene associato un attributo alfanumerico generalmente memorizzato in un database. Le criticità osservate in precedenza aumentano con la necessità di trasformare i disegni CAD relativi agli scavi in oggetti vettoriali corrispondenti a record archeologici, ad esempio strati, strutture, elementi architettonici, etc. Se l'informazione spaziale è parziale, non accurata o ambigua possono essere adottate specifiche strategie per il trattamento dei dati grafici importati in un GIS (Niccolucci, D'Andrea, Crescioli 2000).

Sebbene il GIS sia una tecnologia matura con centinaia di applicazioni e casi di studio in archeologia sviluppati negli ultimi 35 anni, non esistono standard riconosciuti o best practice in grado di automatizzare la trasformazione di elementi CAD in dati GIS. In genere la gestione della digitalizzazione di un archivio cartografico è per lo più lasciata all'archeologo il quale agirà in relazione agli obiettivi della ricerca. Così, il sito può essere un semplice punto in un'analisi inter-sito, o una forma schematica in un GIS intra-sito, oppure una mappa dettagliata che descrive accuratamente i singoli elementi stratigrafici e i livelli 3D.

Un ulteriore livello di criticità è rappresentato dai criteri e dai relativi parametri selezionati per identificare, ad esempio, gli edifici: si deve tracciare una linea per definire l'allineamento di un muro o due linee per indicarne lo spessore, e come si devono elaborare le primitive geometriche che descrivono una struttura riutilizzata appartenente a fasi diverse in cui alcune parti della struttura hanno una lunga durata di sopravvivenza? In generale, gli archeologi risolvono questi dubbi sulla base della documentazione disponibile, soprattutto quella testuale, consistente in diari di scavo, schede, fotografie, etc.

Nonostante i GIS integrino dati grafici e alfanumerici, esiste una profonda differenza tra la teoria e la pratica nella costruzione di un progetto di sistema informativo territoriale; questa diversità dipende talvolta dalle caratteristiche del software che dirige il ricercatore nella implementazione di un sistema basato su un metodo non strutturato e su un approccio manuale. In sintesi, la migrazione di dati 2 o 3D è un compito spesso svolto senza una strategia precisa nella quale prevale piuttosto l'obiettivo di combinare diversi livelli di informazione, geometrici e testuali, relativi all'evidenza disponibile, archeologica e/o dal mondo fisico reale.

Una corretta conversione dei dati garantisce la conservazione a lungo termine degli archivi digitali e riduce il rischio di perdita di informazioni di un patrimonio di conoscenza che spesso non può essere nuovamente registrato. Poiché lo scavo archeologico è per sua natura un processo distruttivo, i ricercatori sono sempre più consapevoli dell'importanza di sviluppare procedure, strategie e buone pratiche per un'adeguata archiviazione dei dati territoriali e per il loro riutilizzo. Dal 2016 l'Archaeology Data Service di York ha avviato un processo di conversione finalizzato alla conservazione di file CAD su larga scala all'interno di un framework conforme al modello di riferimento *Open Archival Information System* (OAIS) (Green, Niven, Field 2016). La migrazione dei dati viene generalmente suddivisa in diverse fasi delle quali la quinta riguarda la creazione di file PDF/A per la divulgazione dei dati. Il processo di conversione non prevede una procedura per il riutilizzo dei file CAD nelle applicazioni GIS. Il modo migliore per riutilizzare piante, sezioni e prospetti nelle piattaforme GIS consiste nella modifica dei dati vettoriali direttamente all'interno dell'ambiente CAD, in modo che possano essere letti e gestiti correttamente in un qualsiasi software GIS. Questo procedimento prevede prioritariamente l'identificazione di entità spaziali, rappresentate in un mondo complesso contraddistinto da una molteplicità di fonti informative, e non semplicemente dalle entità grafiche da disegnare.

Dal CAD al GIS: alcune criticità

Come si è tentato fin qui di dimostrare alcune questioni relative alla migrazione dei dati CAD devono essere esaminate e risolte prima di trasferire i file in un sistema GIS; l'analisi dei dati grafici è il punto chiave dell'intero processo di migrazione. Nell'implementazione di una pipeline di conversione, l'attenzione del ricercatore deve essere principalmente dedicata al controllo della struttura CAD esistente, soprattutto considerando che il file GIS finale risponde a una logica del tutto differente; mentre l'enfasi del CAD è sulla creazione e modifica di documenti grafici, il tratto distintivo del GIS è la

modellazione di informazioni a connotazione geografica relative ad un mondo reale. Una ulteriore differenza risiede nel modo in cui GIS e CAD sono strutturati; i GIS sono database geospaziali che mappano il mondo reale come appare, mentre il CAD è stato sviluppato per disegnare oggetti elaborati da un progettista.

Prima di iniziare il processo di migrazione è necessario osservare alcune semplici regole. Quando si trasforma il CAD in GIS, la sfida risiede nei dettagli. Pertanto, è necessario:

- Convertire le entità grafiche CAD in geometrie GIS, se necessario chiuse ed assegnando ciascuna linea e/o polilinea ad un singolo oggetto;
- Convertire le annotazioni, le etichette e la simbologia CAD in attributi GIS;
- Analizzare altre informazioni CAD come i tag, le entità estese e i dati di oggetti memorizzati in una tabella del disegno;
- Riproiettare il sistema cartesiano CAD in una proiezione geografica.

Il primo punto richiede probabilmente pochi aggiustamenti, poiché alcune geometrie CAD, come le spline, non sono supportate nel GIS; inoltre, la conversione di polilinee/linee/punti CAD in poligoni GIS non è automatica. Se le linee non si collegano perfettamente, è necessario utilizzare funzioni specifiche per trasformarle. È necessaria una funzione di convalida (manuale o automatica) per il successivo controllo della trasformazione delle entità geometriche in oggetti, con la verifica e la relativa gestione di problemi quali geometrie corrotte o auto-intersezioni. Un'altra fase importante della conversione è la selezione delle etichette, testi, blocchi, dimensioni, stili e simboli CAD, che diventano attributi nel set di dati GIS. Allo stesso modo devono essere trattati i tag, le entità estese e gli oggetti-dati. Infine, poiché il disegno CAD non è generalmente georeferenziato, è necessario impostare un sistema di coordinate durante la conversione; la procedura richiede di spostare il disegno su almeno due coordinate note, preferibilmente proiettate in un sistema cartografico (ad esempio, UTM) piuttosto che geografico. Questa fase non coinvolge solo alcune funzioni CAD come MOVE, ma può richiedere anche l'uso di formule come ROTATE, TRANSFORM, TRANSLATION e SCALE il cui uso dovrà essere esaminato in rapporto alle specifiche esigenze di ricerca e alla struttura dei file CAD da convertire.

Tutti i software GIS dispongono di un motore che consente di leggere e visualizzare correttamente file CAD, ma non di eseguire operazioni di analisi e/o manipolazione spaziale, né di interrogare o aggregare i dati. Le procedure di migrazione implementate in alcuni GIS per rendere leggibile i file CAD si basano su passaggi automatici che possono causare la perdita di dati importanti e, pertanto, sono sconsigliate, soprattutto quando non si può controllare la correttezza della topologia degli oggetti.

Un'ulteriore criticità nel passaggio tra i due sistemi risiede nella strategia GIS che il ricercatore intende adottare. In generale, esistono due approcci: il GIS viene implementato adoperando dati digitali nativi, oppure integrando e combinando informazioni disponibili su supporti cartacei con dati digital born. Nel primo caso la filosofia GIS guiderà la progettazione di ogni singola fase di implementazione del sistema; i dati saranno strutturati e formalizzati secondo le caratteristiche dei GIS; le informazioni spaziali saranno strutturate in base agli oggetti e non alle primitive geometriche. Nel secondo caso, diversi approcci metodologici guideranno la costruzione del GIS la cui funzione principale consisterà nell'organizzazione dei dati. Mentre il primo metodo di creazione di un GIS si basa sull'impiego di dati spaziali digitali acquisiti tramite GPS, GNSS, stazione totale, fotogrammetria aerea e terrestre, laser scanner, immagini satellitari, il secondo si fonda su un processo di digitalizzazione/vettorializzazione di mappe cartacee, che possiamo definire Scan2GIS, caratterizzato dalla identificazione manuale o semi-automatica di oggetti strutturati secondo specifiche classi e assegnati a distinti strati informativi.

L'integrazione di record corrispondenti a tematismi differenti non può essere risolta ricorrendo a procedure automatizzate. Su tale punto Chapman (2001, p. 19) segnala che "il riuso delle indagini

archeologiche ha importanti implicazioni in relazione allo sviluppo della gestione e dell'archiviazione dei dati digitali". Il livello di astrazione e di modellazione prescelto per la creazione del GIS risultano determinanti per ridurre possibili rischi derivanti, per esempio, dalla migrazione e dalla successiva fusione di dati multi-temporali e/o acquisiti in momenti differenti.

L'uso di metadati per memorizzare il ciclo di vita dei dati, soprattutto di quelli legacy, costituisce una prassi auspicabile che mette al riparo il ricercatore da errori che possono essere generati nel caso di un successivo riutilizzo degli archivi spaziali in altre applicazioni (Newell, Sacha 1990, Chapman 2001).

Nonostante le profonde differenze concettuali e di struttura, i sistemi CAD e GIS si sono reciprocamente influenzati nel corso degli ultimi 30 anni e oggi i due software appaiono condividere molte funzioni, tra cui un editing avanzato per il disegno delle geometrie. Nel successivo paragrafo verranno esaminate alcune criticità emerse nel corso dell'analisi del vasto archivio informativo che in oltre 70 anni è stato raccolto nelle indagini sul sito di al-Balīd, in Oman; il corretto riesame di questo vasto corpus di legacy data, tra cui un ricco archivio di file CAD, costituisce uno dei principali obiettivi per la ripresa delle ricerche sul terreno.

Il caso di studio di al-Balīd

L'antico porto di al-Balīd, un importante snodo lungo le rotte che attraversavano l'Oceano Indiano in epoca medievale, è stato indagato da numerosi studiosi con finalità e, chiaramente, metodologie diverse che hanno prodotto un ampio archivio di dati archeologici, relazioni e pubblicazioni (da ultimi D'Andrea 2021, D'Andrea *et al.* 2022).

Uno degli obiettivi previsti dalle nuove indagini, promosse dall'Università di Napoli L'Orientale, prevede la sistematizzazione delle precedenti ricerche e la realizzazione di una cartografia digitale che raccolga tutte le planimetrie e i disegni disponibili. A tale scopo è stata avviata una revisione critica dell'intera documentazione grafica esistente in funzione della progettazione di un sistema GIS in grado di riutilizzare i dati finora acquisiti, tra cui un consistente archivio CAD.

Dopo i primi scavi realizzati negli anni 50, P. Costa (1982) eseguì negli anni 70 il primo rilievo dell'area. Delle prime stagioni di indagini, di cui restano planimetrie dei singoli edifici rinvenuti, Costa riconobbe sul terreno molte tracce, ma non riuscì sempre a identificare la reale estensione dei sondaggi. Prima di riprendere gli scavi, egli realizzò una griglia per posizionare tutte le evidenze fino ad allora riportate alla luce. Nel 1995 le indagini sul campo furono riprese da M. Jansen (2015) con l'obiettivo di creare un parco archeologico; alla fine dell'intervento, nel 2003, venne restituita una mappa aggiornata dei rinvenimenti. A Jansen si deve l'introduzione di una innovativa metodologia di documentazione digitale ben descritta, che illustra i vari interventi realizzati. Uno dei primi compiti della missione tedesca fu il controllo della griglia di Costa e la creazione di un nuovo sistema di riferimento completamente tridimensionale, proiettato in coordinate UTM 40N. Per aumentare l'accuratezza del reticolo, l'intera area venne ulteriormente suddivisa in quadrati di 4 mq e tutte le piante, le sezioni e i prospetti vennero vettorializzati in CAD, procedendo in alcuni casi, come per la grande moschea pubblicata da Costa, alla realizzazione di nuovo rilievo. L'archivio grafico di Jansen comprende decine di piani CAD 2D georeferenziati e realizzati per illustrare i monumenti e gli scavi. Molti sforzi sono stati dedicati allo sviluppo di una strategia digitale funzionale alla ottimizzazione della documentazione archeologica pregressa; ad esempio, è stato creato un database per la memorizzazione dei disegni e delle fotografie. Nonostante l'approccio globale, che ha incluso la progettazione e implementazione di un completo sistema di registrazione digitale, l'assenza di descrizioni dello scavo rende pressoché muto l'archivio grafico pubblicato.

Nel 2005-2012 le indagini furono riprese da J. Zarins e L.S. Newton (Zarins, Newton 2012; Newton, Zarins 2010, 2017), i quali eseguirono un aggiornamento della griglia Costa-Jansen. Le nuove trincee vennero posizionate all'interno di una sotto-griglia di cinque metri utilizzata limitatamente alle nuove aree di scavo. A differenza di Jansen, non abbiamo alcun rilievo CAD e quindi le informazioni grafiche relative a questo periodo di indagini sono circoscritte alle figure e alle tavole tratte da relazioni e pubblicazioni edite. Nel periodo 2013-2018 K. Lewis riprese i lavori adottando, come Jansen, un sistema di registrazione digitale per raccogliere i dati direttamente sul campo. Lewis (2015) riutilizzò la rete topografica rielaborata da Zarins e introdusse un più puntuale sistema gerarchico per l'identificazione spaziale dei rinvenimenti: le aree di scavo (modulo di 35×30 m) vennero ripartite in unità (5×5 mq) a loro volta suddivise in loci (unità stratigrafiche).

Dal 2016 un nuovo intervento, realizzato da A. Pavan per conto dell'Office of the Advisor to HM the Sultan for Cultural Affairs ha avuto come obiettivo le indagini e il restauro della cittadella (Pavan, Laurenza, Valentini 2019; Pavan *et al.* 2020). Per avere un rilievo più accurato dei rinvenimenti la griglia originaria è stata ulteriormente suddivisa in quadrati di 5×5 m. Inoltre, l'utilizzo per la prima volta di tecnologie 3D innovative (laser scanner, drone e fotogrammetria terrestre) ha permesso di ottenere una dettagliata replica digitale dell'edificio da cui sono state estratte e analizzate ortofoto, sezioni e prospetti.

Questa breve rassegna degli interventi di scavo eseguiti sul sito evidenzia la grande quantità di risorse spaziali acquisite e, soprattutto, l'esigenza, emersa fin dagli scavi Costa, di disporre di un sistema di riferimento generale per localizzare le strutture archeologiche. Mentre appare semplice l'importazione in GIS della rete topografica con i vari relativi aggiornamenti e ripartizioni, qualche problema emerge nella analisi della documentazione grafica di dettaglio per la quale non sempre si dispone di una adeguata descrizione. Per tali motivi, la creazione di oggetti archeologici, partendo dalle sole primitive geometriche dei disegni CAD o dalle piante edite, risulta un compito piuttosto complesso.

Il processo CAD2GIS e Scan2GIS, cioè la conversione delle informazioni geometriche e grafiche in componenti archeologiche (muri, ambienti, soglie, pavimenti, etc.) spazialmente riferite, deve necessariamente prevedere una fase di studio e analisi dell'evidenza. Una strategia basata sull'impiego di procedimenti di tipo automatico per la strutturazione di oggetti archeologici è altamente rischiosa e con un esito finale imprevedibile, in particolare nel caso della presenza di elementi architettonici riutilizzati o rifunzionalizzati in nuove strutture e/o in fasi successive. L'intervento umano per la strutturazione di questa specifica parte del processo di conversione connesso allo studio diacronico dei monumenti appare, dunque, insostituibile.

Una guida per una applicazione intra-site

L'implementazione di un GIS per gestire un articolato archivio cartografico costituisce il passaggio conclusivo di una fase progettuale dedicata, tra l'altro, a valutare i potenziali target e i possibili errori causati, per esempio, da una georeferenziazione imprecisa o dalla sovrapposizione di fonti eterogenee acquisite a differente risoluzione. Una scheda che registri i vari scavi annotando pochi dati (anno di scavo, autore, numerazione originale se presente, breve presentazione dei principali risultati, etc.) rappresenta il primo step del processo di importazione; questo punto del workflow consente di verificare la congruità delle fonti con il relativo contenuto informativo e di evidenziare le eventuali criticità a livello di reciproche relazioni spaziali. La successiva georeferenziazione dell'estensione dei singoli interventi permette di esaminare il livello di affidabilità e precisione delle mappe cartacee e, quindi, la loro sovrapposibilità. Accertata la coerenza dei livelli, il successivo step riguarda la vettorializzazione delle geometrie con l'identificazione degli oggetti archeologici. In questa fase, grande importanza, è data dalle descrizioni fornite dagli archeologi; solo così è possibile trasformare i dati

geometrici delle mappe cartacee o dei disegni CAD in oggetti archeologici (es. muri, ambienti, finestre, porte, tetti, ecc.), anche se le informazioni grafiche possono risultare parziali e poco esplicative.

La corretta pianificazione delle diverse modalità di strutturazione dell'evidenza archeologica all'interno di un GIS fa in modo che la trasformazione digitale non sia un processo lineare e automatico, orientato all'identificazione degli elementi grafici contenuti in una mappa, ma costituisca uno sviluppo concettuale che integra l'informazione presente nei dati spaziali con le traiettorie di ricerca determinate dall'archeologo. La valutazione delle forme di migrazione di un archivio cartografico rientra, dunque, in un più generale progetto di analisi dei dati disponibili e di tutta la documentazione archeologica prodotta, compresi i disegni CAD.

Anche per la costruzione del GIS per il sito di al-Balīd è stato seguito questo approccio metodologico a partire dalla acquisizione della mappa relativa alla rete topografica rielaborata da Jansen. La griglia è stata successivamente adoperata per l'inquadratura dei differenti interventi realizzati nel corso di 70 anni di indagini sul terreno; in alcuni casi, poiché le mappe originali non erano disponibili, è stato necessario scansionare le piante pubblicate valutando in ciascun caso i problemi legati alla scala e alla corretta identificazione delle informazioni archeologiche contenute nelle fonti edite. I disegni CAD, relativi ai limiti dei vari scavi, sono stati importati senza alcun particolare intervento di ricodifica, ma semplicemente assegnando al file il sistema di proiezione geografica scelto come riferimento.

Due esempi, tratti dall'archivio cartografico, mostrano la complessità del lavoro di progettazione e implementazione di un GIS che si basa su legacy spatial data. Nel primo (Fig. 1) si illustra la georeferenziazione della mappa relativa allo scavo della cittadella (identificato come "palace" da Albright), precedente all'avvio dei lavori di Pavan e sovrapposta all'attuale pianta del sito ripresa da Google Earth e alla griglia Costa; la figura presenta anche il rilievo della grande moschea eseguito da Jansen partendo dalla digitalizzazione della mappa disegnata da Costa. Mentre per quanto riguarda la cittadella al processo di georeferenziazione è seguita la fase della vettorializzazione delle strutture, per la grande moschea la procedura si è rivelata più complessa benché si disponesse di un disegno CAD.

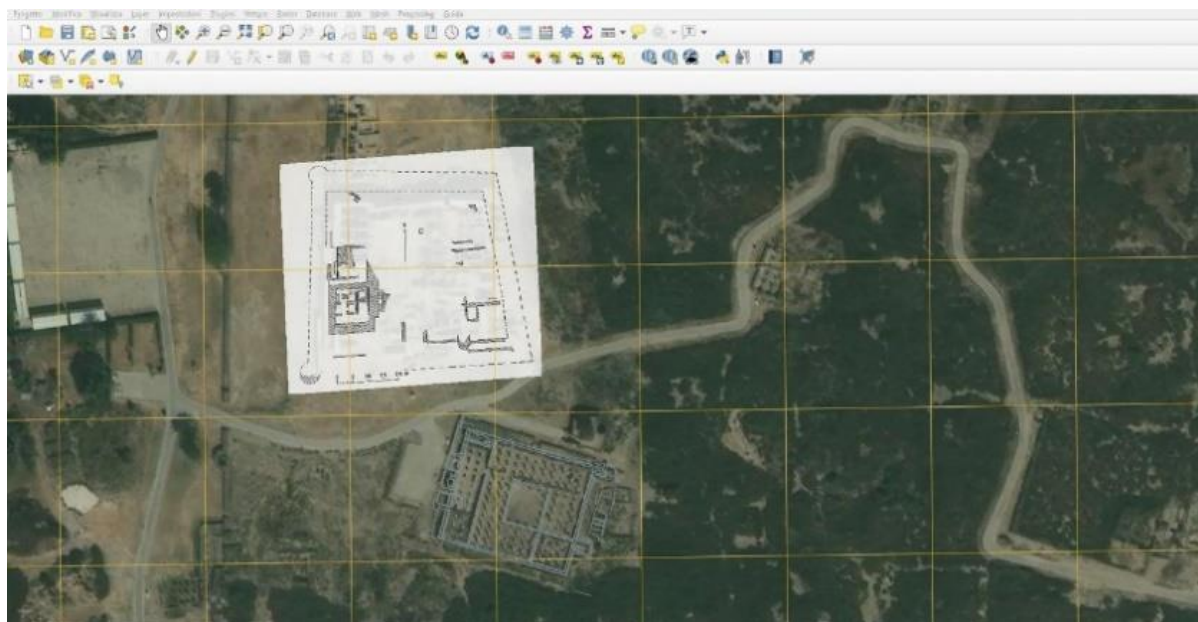


Fig. 1 - L'area ovest di al-Balīd tratta da Google Earth, con la sovrapposizione della griglia Costa, la cittadella scavata da Albright (1982) e la grande moschea rilevata da Jansen (2015)

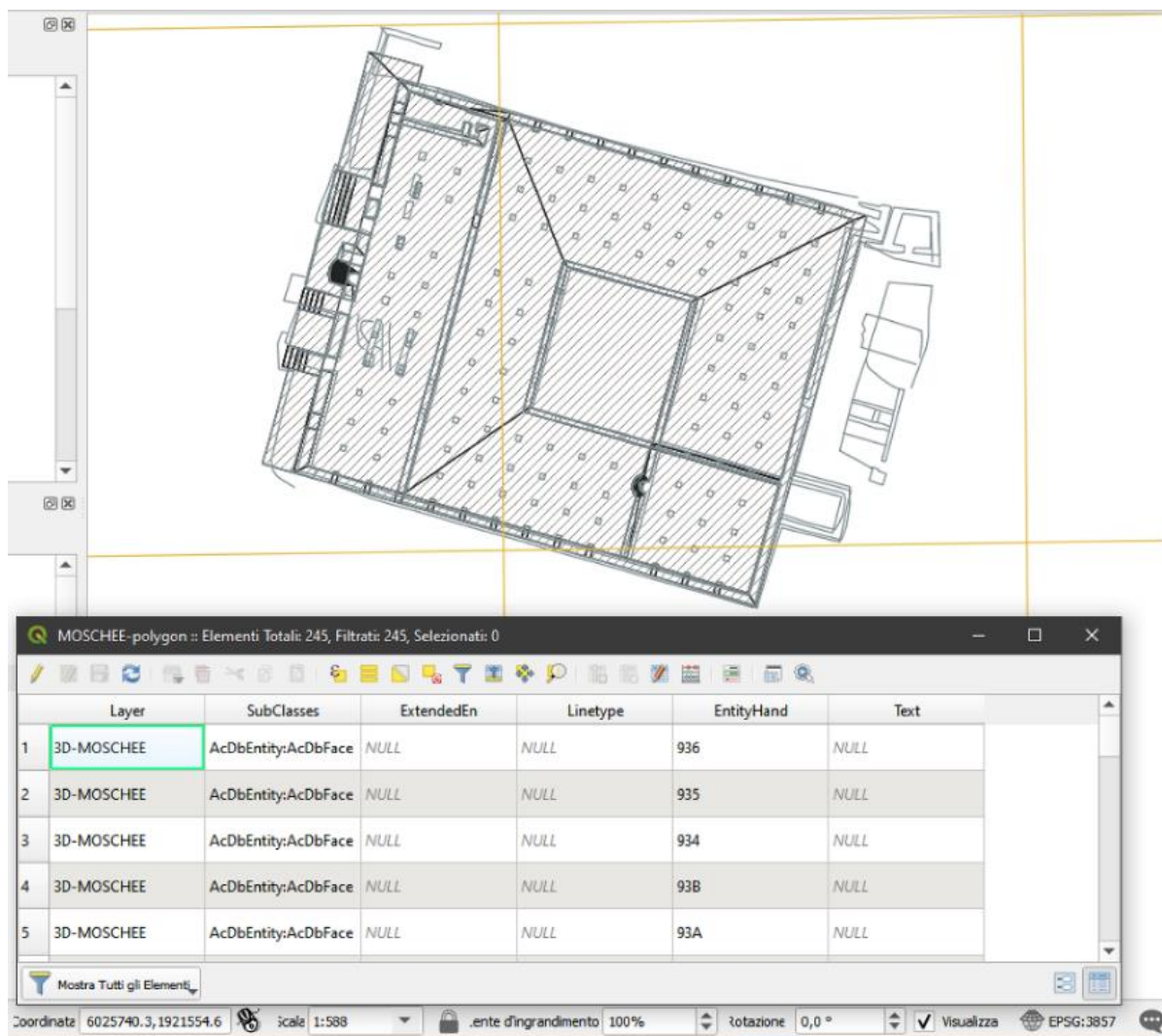


Fig. 2 - Importazione del file CAD in QGIS: in basso la tabella CAD associata alle informazioni grafiche disegnate in CAD (per gentile concessione dell'Office of the Advisor to HM the Sultan for Cultural Affairs)

La Fig. 2 mostra la tabella associata ai vari elementi grafici vettoriali; poiché le entità fanno riferimento a layer e classi di tipo generale, i singoli tratti grafici non possono essere uniti automaticamente per creare i differenti oggetti che compongono il monumento (muri, colonne, pavimento, etc.). Le 245 entità grafiche del file CAD relativo alla grande moschea dovranno essere unite manualmente per consentire la ricostruzione di oggetti corrispondenti agli elementi architettonici e strutturali del monumento; poiché dai testi pubblicati sappiamo che l'edificio (o parte di questo) è stato costruito su strutture più antiche, solo leggendo la documentazione di scavo sarà possibile identificare le diverse fasi di costruzione della moschea e creare specifici oggetti GIS relativi alle differenti edificazioni. Questo primo esempio evidenzia il divario di accuratezza tra i livelli di informazione disponibili e la difficoltà di un processo di georeferenziazione che non permette sempre di verificare sul terreno la precisione del posizionamento del rilievo originale senza eventuali nuove misurazioni. Inoltre, il caso della grande moschea sottolinea come l'importazione di dati CAD sia il risultato di una riflessione che coinvolge il trattamento delle informazioni grafiche, l'analisi delle relazioni di scavo e l'esame delle ipotesi ricostruttive. L'archeologo dovrà chiaramente gestire una serie di criticità, difficilmente

risolvibili in modo definitivo, e operare alcune scelte per la codifica delle informazioni parziali o non verificabili. L'uso di appropriati metadati consente di descrivere e registrare i vari passaggi che caratterizzano la conversione e le decisioni adottate nella valutazione dei casi complessi.

Il secondo esempio proviene dal cosiddetto quartiere indiano scavato da Zarins (Newton Zarins 2014); per questa area non esistono disegni CAD e l'unica mappa attualmente disponibile per la digitalizzazione delle evidenze archeologiche è ricavabile da un contributo edito privo di dettagliate informazioni di scavo. Esaminando la pianta si evidenziano numerose aree di non facile interpretazione che rendono il processo di vettorializzazione particolarmente arbitrario e, quindi, rischioso (Fig. 3). L'assenza di schede o relazioni che illustrino l'articolazione dello scavo e la sua interpretazione rende la fase di identificazione semantica degli oggetti molto soggettiva e impossibile da automatizzare. Qualsiasi semplificazione nella creazione di oggetti archeologici può avere conseguenze negative sulla corretta organizzazione e gestione delle informazioni archeologiche.

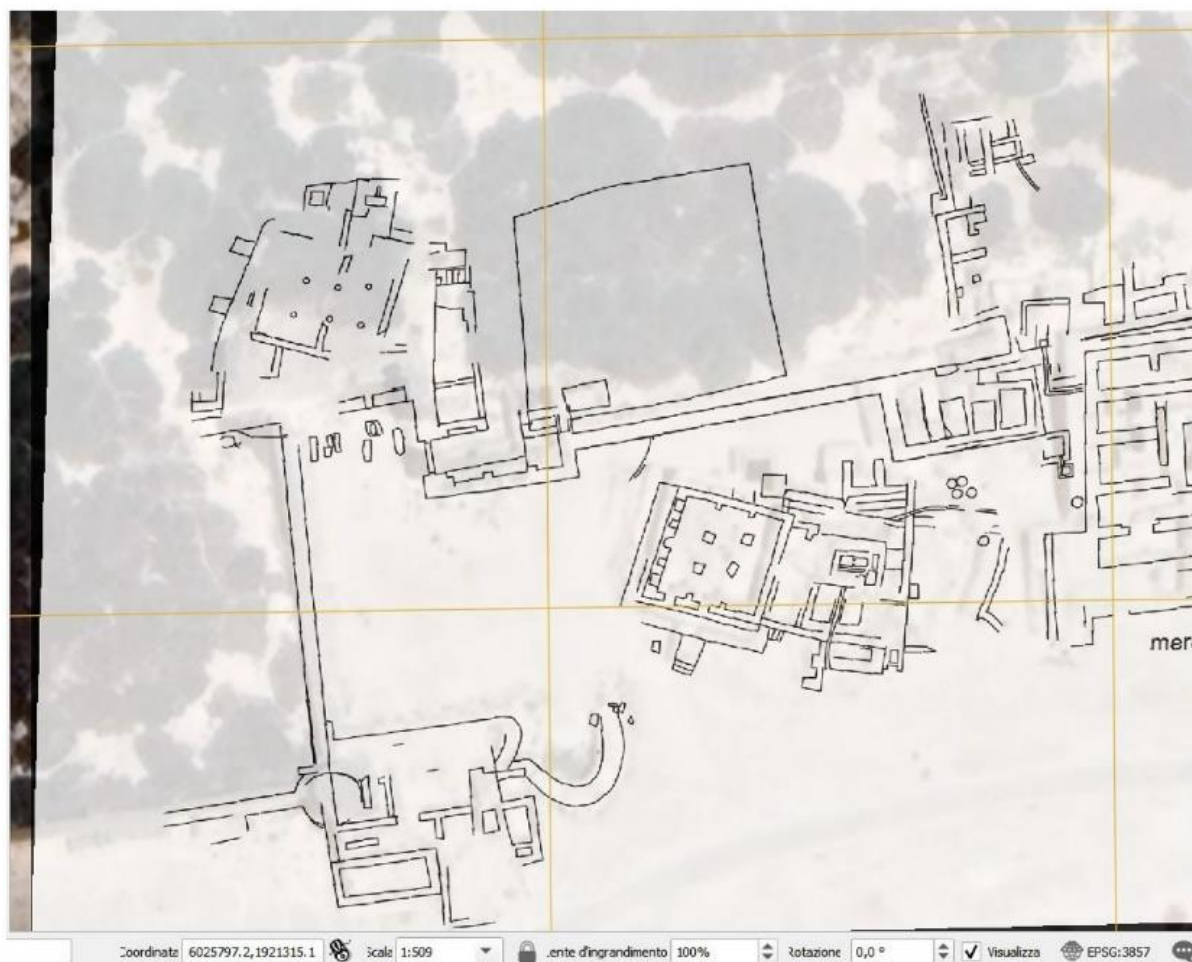


Fig. 3 - La mappa geo-riferita del quartiere indiano (Newton, Zarins 2014)

I test effettuati finora su alcune parti dell'archivio cartografico di al-Balīd mostrano quanto sia complessa e piena di pericoli la strada per lo sviluppo di una procedura che semplifichi la conversione dei disegni CAD e della documentazione planimetrica cartacea e, nello stesso tempo, conservi le relazioni topologiche tra gli oggetti (al-Rawashdeh Balqies Sadoun, Al Fukara 2012).

Il disegno CAD può trasmettere impressioni e suggestioni nella lettura della mappa; tratteggi, stili di linea, retini possono indicare l'allineamento di un muro, la chiusura di un ambiente, lo sviluppo di uno strato e la ricostruzione di un settore dello scavo. Al contrario, il sistema GIS necessita di un più rigorosa e formale definizione delle varie geometrie, che si può realizzare solo attraverso la costruzione di elementi grafici associabili ad un unico contenuto alfanumerico. Il rischio è quello di utilizzare il GIS come un motore CAD più moderno che integra facilmente altri supporti cartografici per creare mappe composite, ma incapace di utilizzare le funzioni topologiche per analisi distributive e insediative più complesse.

La digitalizzazione di mappe cartacee, assieme all'importazione di disegni CAD, si intreccia, dunque, con questioni di metodo che non possono essere risolte dallo sviluppo di procedure automatiche e/o di software che aiutino il ricercatore a scegliere la soluzione migliore per un'interpretazione scientificamente sostenibile dei resti archeologici. Il passaggio da elementi grafici, cartacei o digitali, a oggetti semantici richiede uno sforzo in termini concettuali che può essere paragonato quasi allo stesso processo di scoperta del record archeologico. Questo approccio è ancora saldamente nelle mani dell'archeologo che deve districarsi tra sovrapposizioni stratigrafiche, non sempre chiare, ed entità geometriche e/o semantiche che riproducono digitalmente le evidenze portate alla luce.

Quando un disegno CAD viene importato in un sistema GIS, il software riconosce le caratteristiche geometriche degli elementi grafici: punti, linee, poligoni e, infine, annotazioni; questa suddivisione si basa esclusivamente sugli strati CAD originali, senza alcuna interazione tra i dati e il mondo reale. Solo l'intervento umano è in grado di completare il processo di migrazione attraverso la trasformazione degli elementi grafici dei disegni CAD in oggetti reali tratti dal mondo fisico.

Conclusioni

Mentre per molti anni il record archeologico è stato considerato il risultato di un'attività distruttiva, la registrazione digitale ha portato a considerare le informazioni come il prodotto di un fase creativa di acquisizione di dati di alta qualità (Roosevelt *et al.* 2015). Negli ultimi anni questa visione efficientista e pervasiva dell'informatica è stata contrastata da studiosi che, privilegiando un'archeologia lenta, criticano l'idea stessa che l'informatica serva a velocizzare o semplificare l'acquisizione e la gestione dei dati sottolineando, invece, la natura di marginalizzazione dell'intervento umano nel processo di digitalizzazione dell'informazione (Caraher 2019).

Nonostante i punti di vista differenti sul riconoscimento della funzione creativa o meno della documentazione, lo scavo resta un processo distruttivo e il record archeologico una informazione che deve essere adeguatamente registrata e messa a disposizione dei ricercatori. La consapevolezza dell'importanza dello sviluppo delle fasi di documentazione ha portato all'acquisizione di sistemi che registrano digitalmente tutti i momenti di uno scavo. Questo approccio ha certamente contribuito a un progresso nei metodi di formalizzazione e scrittura della documentazione archeologica, ma, nello stesso tempo, ha prodotto nuove sfide, soprattutto in relazione alla migrazione e gestione di pregressi archivi di legacy data spaziali.

Molti progetti archeologici adottano specifiche strategie per produrre, gestire e mantenere il record spaziale; l'uso di strumenti di precisione (GNSS, UAV, stazioni totali) spinge gli studiosi a registrare i dati spaziali direttamente sullo scavo. La creazione di un sistema topografico affidabile permette di ancorare qualsiasi record spaziale con un alto livello di accuratezza, riducendo il rischio di possibili errori; una rete, locale o georeferenziata, permette anche di posizionare e geo-riferire vecchi rilievi cartacei o digitali.

Nonostante l'ampia diffusione delle tecnologie di rilievo digitale, permangono alcune criticità connesse soprattutto al legame, spesso implicito, tra documentazione cartacea e/o digitale e conoscenza archeologica.

Nei primi anni della digitalizzazione si è assistito a un aumento dei disegni CAD che hanno supportato le indagini archeologiche incoraggiando gli studiosi verso l'organizzazione e la gestione di archivi di dati a connotazione spaziale. L'aggiornamento periodico delle planimetrie, in base allo sviluppo della ricerca sul campo, ha contribuito a rendere insostituibile l'uso di disegni digitali. Il perfezionamento della documentazione grafica permetteva ai ricercatori di tenere rapidamente sotto controllo l'intera evoluzione dello scavo e di pianificare gli interventi successivi. Oggi, con la diffusione dei sistemi GIS, CAD e, più recentemente, BIM, la gestione dell'informazione territoriale e geografica è diventata molto complessa sia per gli aspetti legati alla concettualizzazione dei dati sia per il formato e i software di elaborazione e visualizzazione degli archivi cartografici. La rapida evoluzione degli strumenti a disposizione fa emergere, nello stesso tempo, il problema del recupero dei disegni CAD e del loro utilizzo in più moderni sistemi di gestione.

Nell'esempio qui presentato, la progettazione di un GIS ha richiesto la rilettura dell'intero archivio cartografico, compresi i disegni cartacei e quelli digitalizzati o prodotti in CAD. L'articolo, che si è focalizzato sugli aspetti dell'implementazione del sistema e su una possibile migrazione di un archivio CAD, ha mostrato quanto la conversione dei dati spaziali si basi su un lavoro intuitivo e paziente che consiste nell'esaminare, laddove possibile, le notizie relative allo scavo delle evidenze. Nel passaggio da entità grafiche e geometriche astratte ad un ecosistema digitale semantico il ricercatore dovrà scegliere la soluzione migliore utilizzando la documentazione archeologica disponibile, sebbene largamente incompleta e spesso priva dei necessari dati stratigrafici. La progettazione e l'implementazione di un GIS contribuiscono in tal modo alla rilettura dell'archivio cartografico; tuttavia, poiché il percorso sarà caratterizzato da scelte e soluzioni non sempre generalizzabili, la creazione di un set adeguato di metadati potrà aiutare il ricercatore nel rendere questo processo di migrazione trasparente e i dati riutilizzabili per nuove indagini.

BIBLIOGRAFIA

- Albright, F.P. (1982) *The American Archaeological Expedition in Dhofar, Oman, 1952–1953*. Washington, DC.
- Alperson-Afil, N. (2019) Digitising the Undigitized: Converting Traditional Archaeological Records into Computerized, Three-Dimensional Site Reconstruction, *Journal of Graphic Information System* 11, pp. 747-765.
- Beex, W. (1994) From Excavation Drawing to Archaeological Playground: CAD Applications for Excavations, in J. Wilcock, K. Lockyear (eds.), *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1993*, pp. 101-108. Oxford.
- Beale, G., P. Reilly (2017) Digital Practice as Meaning Making in Archaeology, *Internet Archaeology* 44 (<https://doi.org/10.11141/ia.44.13>; ultimo accesso 8.2.2023).
- Bibby, D., B. Ducke (2017) Free and Open-Source Software Development in Archaeology. Two Interrelated Case Studies: gvSIG CE and Survey2GIS, *Internet Archaeology* 43 (<https://doi.org/10.11141/ia.43.3>; ultimo accesso 8.2.2023).
- Caraher, W. (2019) Slow Archaeology, Punk Archaeology, and the 'Archaeology of Care', *European Journal of Archaeology* 22/3, pp. 372-385.
- Chapman H. (2001) Understanding and Using Archaeological Topographic Surveys – The 'Error Conspiracy', in Z. Stančič, T. Veljanovski (eds.), *Computing Archaeology for Understanding the Past, CAA 2000*, pp. 19-24. Oxford.

- Costa, P. (1982) The Study of the City of Zafār (al-Balīd). *The Journal of Oman Studies* 5, pp. 111-150.
- D'Andrea, A. (2021) Reconsidering the Topography of al-Balīd: A Preliminary Review of the Graphical Documentation, *Annali dell'Università di Napoli L'Orientale - Sezione Orientale* 81, pp. 39-50.
- D'Andrea A., R. Giunta, A. Pavan, R. Valentini, eds. (2021) *The Site of Zafār/al-Balīd (Sultanate of Oman). Archaeological Investigations between Past and Present* (Newsletter di Archeologia CISA 12). Napoli.
- Green, K., K. Niven, G. Field (2016) Migrating 2 and 3D Datasets: Preserving AutoCAD at the Archaeology Data Service, *ISPRS Int. J. Geo-Information* 5, 44 (<https://doi.org/10.3390/ijgi5040044>; ultimo accesso 8.2.2023).
- Kvamme, K. (1989) Geographic Information Systems in Regional Archaeological Research and Data Management, in M.B. Schiffer (ed.), *Archaeological Method and Theory*, Vol. 1, pp. 139-203. Tucson.
- Jansen, M. (2015) *The Archaeological Park of Al-Baleed, Sultanate of Oman. Site Atlas along with selected Technical Reports 1995-2001*. Muscat.
- Lewis, K.A. (2015) Al Baleed Excavation Field Report 2015. A Results of the Summer 2015 Campaign of the American Archaeological Mission to the Land of Frankincense, Oman. Salalah [Unpublished Report; Office of the Advisor to HM the Sultan for Cultural Affairs].
- Messika, N.R. (1996) Autocad for Archaeology: A New Era in Archaeology, *Archeologia e Calcolatori* 7, pp. 951-954.
- Newell, R.G., T.L. Sancha (1990) The Difference between CAD and GIS, *Computer-Aided Design* 22, pp. 131-135.
- Newton, L.S., J. Zarins (2010) Preliminary Results of the Dhofar Archaeological Survey, *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 40, pp. 247-266.
- Newton, L.S., J. Zarins (2014) A Possible Indian Quarter at al-Baleed in the fourteenth-Fifteenth Centuries AD, *Proceedings of the Seminar for Arabian Studies* 44, pp. 257-276.
- Newton, L.S., J. Zarins (2017) *The Archaeological Heritage of Oman. Dhofar Through the Ages. An Ecological, Archaeological and Historical Landscape*. Muscat.
- Niccolucci, F., A. D'Andrea, M. Crescioli M. (2000) GIS-based Analysis of the Etruscan Cemetery of Pontecagnano Using Fuzzy Logic, in G. Lock (ed.), *Beyond the Map: Archaeology and Spatial Technologies*, pp. 157-179. Amsterdam. Berlin. Oxford. Tokyo. Washington DC.
- Pavan, A., S. Laurenza, R. Valentini (2019) Masonry and Building Techniques in a Medieval City Port of the Sultanate of Oman: Preliminary Typological Atlas at al-Balīd, *Newsletter di Archeologia CISA* 10, pp. 321-344.
- Pavan, A. et al. (2020) New Research at the Port of al-Balīd and its Castle (Husn): Interim Report (2016-2018), *The Journal of Oman Studies* 21, pp. 172-199.
- Al-Rawashdeh Balqies Sadoun, S., A. Al Fukara (2012) CAD File Conversion to GIS Layers: Issues and Solutions, *International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS)*, pp. 1-6.
- Reilly P. (1991) Towards a Virtual Archaeology, *CAA90. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology* (BAR International Series 565), pp. 132-139. Oxford.
- Roosevelt, C.H. et al. (2015) Excavation is Destruction Digitization: Advances in Archaeological Practice, *Journal of Field Archaeology* 40/3, pp. 325-346.
- Zarins, J., L.S. Newton (2012) *Al-Baleed: Ancient Zafar, Sultanate of Oman. Report of Excavations, 2005–2011 and Salalah Survey*. Muscat. [Unpublished Report; Office of the Advisor to HM the Sultan for Cultural Affairs].