

Metodi avanzati di analisi e monitoraggio delle superficie musive pavimentali della Basilica di San Marco a Venezia.

Cristiana ACHILLE, Raffaella BRUMANA, Luigi FREGONESE,
Carlo MONTI, Federico PRANDI, Carlo SAVI

Politecnico di Milano, DIAR Dip. di Ingegneria Idraulica, Infrastrutture Viarie, Ambientale e Rilevamento
Sez. Rilevamento. P.zza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano Tel. +39 02 2399 6533 - Fax. +39 02 2399 6550
cristiana.achille@polimi.it, raffaella.brumana@polimi.it, luigi.fregonese@polimi.it,
carlo.monti@polimi.it, federico.prandi@polimi.it, carlo.savi@polimi.it

Abstract

In questo lavoro vengono descritte le fasi della ricerca¹ in corso di sviluppo per la generazione di un modello ad alta risoluzione del pavimento musivo della Basilica di San Marco a Venezia. Ai fini della manutenzione programmata effettivamente realizzata con manodopera interna della procuratia di San Marco, occorre sviluppare e superare la dicotomia che si genera tra i costi di impianto dei cantieri e i tempi per la realizzazione degli interventi. La possibilità dell'utilizzo di ortofoto digitali ad alta risoluzione riduce notevolmente entrambi gli aspetti introdotti. Lo studio mette in luce, oltre alle metodologie approntate per realizzare tali interventi, i modelli di confronto sulle serie temporali di dati di controllo altimetrico della pavimentazione realizzati a partire dal 1980. Sono evidenziati i confronti sui modelli complessi di superfici realizzate a partire da dati discreti provenienti da livellazioni storiche, da dati di controllo realizzati mediante livello digitale Leica NA3003, da punti ricavati mediante autocorrelazione fotogrammetrica digitale mediante prese ad alta risoluzione realizzate con al camera DB44 Rollei e acquisizioni laser scanner effettuate con il Cyra 3500.

This paper describes the phases of the research conducted to generate a high resolution model of the mosaic floor of St. Mark's Basilica in Venice. In order to perform accurate and effective scheduled maintenance, competently executed by the personnel of St. Mark's Basilica, it is necessary to get over the dichotomy that is generated between the site system cost and the time for the realization of the participations of restoration. Use of high resolution digital orthophotos makes it possible to reduce both of the introduced aspects. The research finds, beyond the methodologies used for the realization of the interventions, the models of comparison of altimetric control data temporal series of interventions on the floor executed since 1980. It finds a comparison between complex surface models realized to leave: from the data originating from historical levelling, control data realized with digital level Leica NA3003, from point gains with digital photogrammetric autocorrelation by means of high resolution photos taken with a Rollei DB44 camera, laser scanner survey conducted with a Leica HDS 3000.

1. Introduzione

Per mosaico si intende la decorazione di una superficie architettonica per mezzo di pietruzze, di pezzetti di terracotta o pasta vitrea, giustapposti o fissati saldamente su uno strato d'intonaco, formanti esternamente una superficie liscia per lo più decorata con rappresentazioni geometriche o figurate.

¹ Questa ricerca è stata in parte finanziata con PRIN 2002 e 2004. LA campagna di rilievo è stata realizzata con il contributo di G. Monti, L. Taffurelli, S. Morandi, C. Monti.

Il termine, di etimologia incerta ma con probabilità derivato dal greco *musa* (μουσα), appare nella letteratura romana negli *Scriptores Historiae Augustae*, attribuito a Sparziano sulla vita di Pescennio Nigro, in un passo della quale il ritratto dell'imperatore è detto *pictum de musio*. Le precise indicazioni per la tecnica di costruzione di un mosaico pavimentale lasciateci da Vitruvio (VII, i) e da Plinio (*Nat.hist.*, XXX VJ,186-7) trovano

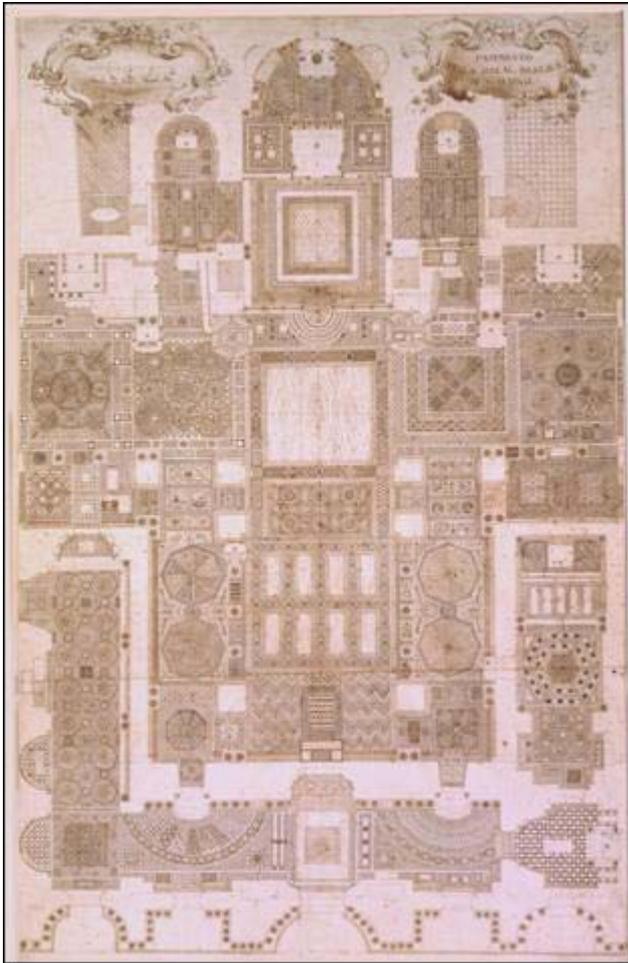


Fig. 1 Disegno a penna sanguigna dell'antico pavimento tessulare di San Marco ad opera di Antonio Visentini

riscontro in una quantità di documenti originali. Si trovano tessere vitree già nei mosaici più antichi, ma San Marco, iniziata verso la fine del 1° millennio risente della moda che si instaura alla fine dell'antichità e cioè quella del mosaico a "tappeto" (fig. 1) con tutto il campo cosparso di motivi geometrici quali quadrati, rettangoli, rombi, ottagoni, esagoni, semicerchi con un campionario di soggetti vari entro ogni geometria, come uccelli o bestiari presi dal mondo pagano ma col nuovo significato simbolico attribuito loro dal pensiero cristiano. Saltando qualche secolo e seguendo i presupposti dell'architettura religiosa bizantina, anche in San Marco viene rispettato il principio della bipartizione tra zona terrena (pavimento-pareti) e parte celeste (volte e cupole) la cui destinazione e funzione sono sottolineate dal diverso materiale di rivestimento delle murature. La parte superiore dell'edificio assume una connotazione vistosamente celeste e metafisica con mosaici a lamina d'oro; la zona inferiore, invece, sottolinea la natura terrena per la consistenza del marmo delle pareti e del pavimento, che è un vero e proprio tappeto marmoreo che si estende per 2100m². Convivono nel pavimento marciano *l'opus sectile* (ottenuto dall'accostamento dei pezzi di marmo di vari colori che formano le geometrie più varie) e *l'opus tessellarum* (ottenuto da piccolissimi pezzetti di marmi e di vetri in grado di dar vita a figure floreali o animalistiche) con netta prevalenza in San Marco del primo sul secondo. Entrambe le tecniche hanno origine nell'antichità, come visto. In questo schema rigorosamente geometrico si trovano sui margini animali simbolici ed elementi floreali, tra cui si impongono, per preziosità cromatica e raffinatezza esecutiva, le due coppie di pavoni della navatella destra, o meridionale, conservate quasi integre, oggetto delle prime prove di ortofoto 3D alla scala 1:1.

2. Monitoraggio della Basilica

Dalla fine degli anni '80 la Procuratoria di San Marco ha deciso di sottoporre a controllo una ottantina di punti sparsi ancorati nella struttura portante, quindi sui muri non ricoperti dai marmi (cripta e intradosso facciata) e al di sopra dei rivestimenti parietali marmorei, mediante livellazione di alta precisione. Ciò allo scopo di controllare periodicamente i movimenti della struttura, viste anche le ondulazioni del manto musivo pavimentale. Le cause dei movimenti avvenuti nel tempo sono imputabili soprattutto a interventi del passato, quali i sovraccarichi relativi all'innalzamento delle cupole in legno e piombo su quelle bizantine, avvenuto nel XIII secolo, ma anche alle variazioni di carico dovute a cedimenti differenziali delle crete sabbiose del sottosuolo e di

conseguenza delle fondazioni, all'azione continua di lievi scosse telluriche, all'effetto delle maree, ai fenomeni dell'acqua alta ed infine alla subsidenza che interessa tutta l'area del Nord-Est Adriatico. Dopo controlli trimestrali durati alcuni anni, per depurare i movimenti legati ai cicli stagionali e agli effetti di marea dai veri e propri movimenti relativi fra i punti rispetto a un caposaldo di riferimento posto nella cripta, attualmente il controllo avviene con ciclo annuale. Nel corso degli anni si è visto che la Basilica si muove sensibilmente per effetti stagionali, ma nel ciclo annuale è sostanzialmente stabile e gli effetti visibili delle ondulazioni del pavimento non sono correlabili ai movimenti della Basilica stessa (fig. 2, V.T. 89/04).

L'entità degli spostamenti, variabile da punto a punto, depurata da qualche punto anomalo per cause accertate (danneggiamento) non supera in 15 anni il millimetro e mezzo. Nel corso di questi ultimi anni è stato controllato, sempre con livellazione di precisione, il pavimento in più di 1000 punti (fig. 3). I suoi movimenti sono assai più sensibili agli effetti perturbanti dovuti alle sottospinte provocate dalle maree (noto fenomeno dell'acqua alta). L'andamento ondulatorio del pavimento gioca un importante ruolo nelle procedure di restauro dei mosaici.

3. Il rilievo e la rappresentazione del manto musivo

Il mosaico pavimentale si adagia sul sottofondo della chiesa marciana risentendo delle anomalie del suo andamento. E' ben noto come l'arte del mosaico fosse considerata un'arte di infima qualità nei tempi antichi e fino a quando non gli è stata riconosciuta una valenza artistica pari a quella riconosciuta ad altre forme di rappresentazione (pittura e scultura), il restauro si traduceva in un rinnovamento della superficie ammalorata modificando quadri e apparati. L'ondularità del pavimento era eliminata e di conseguenza lo strato musivo veniva sollevato e rifatto, generalmente seguendo il disegno originario, ma spesso rinnovato secondo il "gusto" e le tecniche dell'epoca. Nel XVI e XVII secolo l'influenza di grandissimi pittori prevale sui mosaicisti, ridotti a meri riproduttori in mosaico, mediante la tecnica del "cartone" per trasferire il disegno sulla parete, delle grandi tele di artisti come Paolo Uccello, Tintoretto, Veronese, Andrea del Castagno, Mantegna e Tiziano, chiamati a rifare parti di pavimento consumati e in cattivo stato.

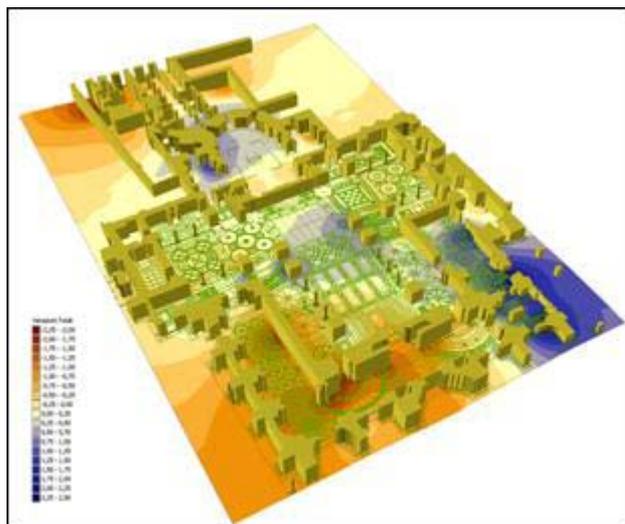


Fig. 2 Controllo della Basilica. Variazioni totali nel periodo 1989 - 2005

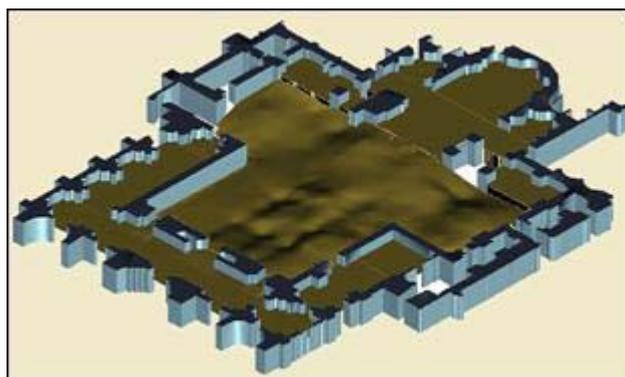


Fig. 3 DTM del pavimento della Basilica, determinato con 1000 punti di livellazione

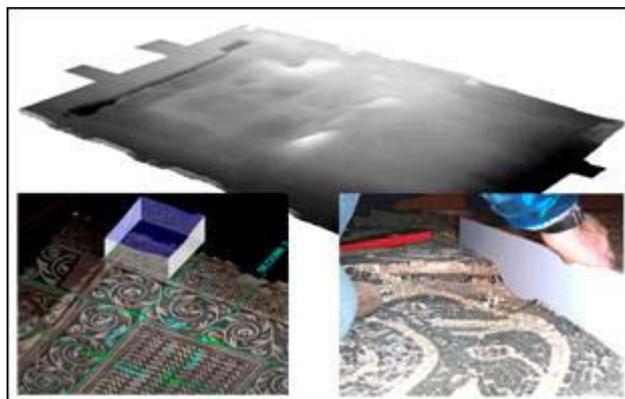


Fig. 4 Modello 3D del pavimento da restaurare

Soltanto dalla seconda metà dell'Ottocento l'impegno del proto Pietro Saccardo, conformemente alle sollecitazioni di John Ruskin e Alvise Zorzi per il rigoroso rispetto della storia, si sviluppa il concetto di conservazione nelle pratiche di restauro e di manutenzione e si cerca di individuare il metodo più adatto a rappresentare e mantenere la complessità del monumento in tutte le sue forme.

La ricerca di un mezzo per descrivere con immediatezza il fenomeno dell'ondularità, in vista di un utilizzo in cantiere, ha portato in questi anni a preferire modelli di rappresentazione tridimensionali che sono stati via via migliorati fino alla realizzazione attuale dell'Ortofoto Digitale 3D in scala 1:1. Il grado di completezza e precisione raggiunti con il rilevamento di una porzione di pavimento di circa 40m², oltre che la fattibilità in termine di tempi e costi, ha permesso di estendere l'applicazione di questa metodologia a tutti i 2100m² di superficie mosaicata calpestabile della chiesa marciana.

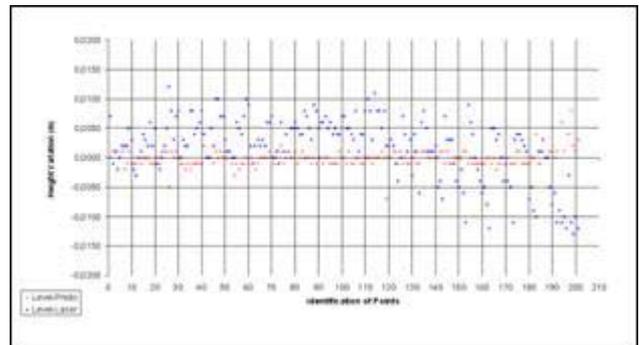


Fig. 5 Punti di controllo fotogrammetrici. In ordinata sono rappresentati gli scarti tra i punti di controllo livellati e le quote desunte dal DTM

4. L'Ortofoto Digitale 3D — Area test

L'ortofoto digitale tridimensionale è ottenuta a partire da:

- prese con camera fotogrammetrica Rollei DB44 Metric a 16 milioni di pixel (0,009 mm), con obiettivo f/40 calibrato, da un'altezza di 2,10 m;
- appoggio dei blocchi a punti di controllo determinati topograficamente;
- soluzione dei blocchi mediante TA a stelle proiettive;
- costruzione del DTM mediante matching d'immagine.



Fig. 6 Confronto tra i punti di controllo di livellazione e le quote estratte dal DTM fotogrammetrico

L'ortofoto così ottenuta, con risoluzione a terra di 0,5mm permette di documentare la disposizione e lo stato di conservazione d'ogni tessera del mosaico, e parallelamente fornisce informazioni sui livelli di quota di tutto il pavimento. E' stata dapprima testata l'area dei pavoni prima citata realizzando una ortofoto stampata su trasparente alla scala 1:1 per vedere il livello di coincidenza geometrica e mettere a punto quella cromatica, risultato più che soddisfacente. Si è passati poi al rilievo dell'area citata che si trova nel braccio destro del transetto, di fronte all'ingresso alla Camera del Tesoro, non accessibile ai visitatori a causa dei lavori di restauro, resi necessari dal forte degrado che ha compromesso la superficie musiva (fig. 4).

Il sistema di presa è analogo a quello della fotogrammetria aerea: la macchina fotografica è montata su un carrello con una distanza di presa dall'oggetto di circa 2m, consentendo un ricoprimento a terra per ogni fotogramma di 4m² per un totale di 27 prese, suddivise in tre strisciate. In base al ricoprimento di ogni presa fotografica e alla sovrapposizione tra queste si è programmata la distribuzione a terra dei punti d'appoggio, rilevati topograficamente con stazione totale motorizzata TCRAI 103 e con livello digitale ad elevata precisione Leica NA3003 per contenere l'errore di posizione dei punti in un paio di millimetri e in quota al di sotto del millimetro. In totale i punti di appoggio sono stati 70, nove per ogni immagine e distribuiti regolarmente con passo 85 x 75 cm sull'area del rilievo. Tutti sono stati utilizzati nel calcolo per l'orientamento delle prese attraverso la

triangolazione aerea per stelle proiettive, ottenendo così un modello iperdeterminato e controllabile. In questa fase (maggio 2004), per la realizzazione dell'ortofoto e del modello tridimensionale, si è utilizzato il software APEX PCI 7.0 e successivamente per la loro visualizzazione e per la gestione di informazioni contenute nel DTM, il pacchetto ArcGIS 8.1 e ArcINFO 8.0.2 (ESRI).

Le ventisette prese sono state poi importate nel programma APEX nel formato tiff senza compressione per avere la massima risoluzione necessaria a una ortofoto in scala 1:1. La mole dei dati che il software deve gestire è di conseguenza molto consistente poiché ogni immagine è in media di 48.7MB, per un totale di 1.25GB di informazioni. I programmi utilizzati per visualizzare tutte le immagini contemporaneamente ricorrono alla cosiddetta "piramide d'immagine", con otto livelli di risoluzione via via decrescenti, utilizzate secondo il grado di zoom attivato. La costruzione del DTM è stata impostata su una maglia molto fitta di nodi (15 x 15 mm) di cui il programma misura le quote sulle immagini orientate e per interpolazione determina quelle per gli spazi tra punto e punto, in modo che la superficie risulti ininterrotta e il più possibile coerente con la realtà. Il grado di corrispondenza tra il DTM e l'andamento reale del mosaico dipende dal passo di griglia sul quale viene creato. Occorre raggiungere un equilibrio soddisfacente fra tempi di calcolo e dimensione della griglia. E' possibile stabilire anche il grado di "lisciamento" (smoothing) della superficie e l'eventuale inserimento di breakline. In questa area test il mosaico è caratterizzato da un forte degrado, con rigonfiamenti e rotture anomale della superficie, dovuti a forti tensioni tra gli elementi costituenti lo strato di supporto delle tessere. Questi sollevamenti sono imputabili all'utilizzo, nella malta di allettamento, di un cemento che ha reagito chimicamente con i sali marini che risalgono in superficie dal sottofondo, portando nel giro di poco tempo, dopo anni dal suo utilizzo, una condizione di forte degrado. L'errore di posizione è risultato assolutamente trascurabile e l'errore massimo tra le quote topografiche dei punti d'appoggio e quelle dei punti misurati sul modello dopo la triangolazione e dopo la creazione del DTM, sono al di sotto del millimetro. La stampa eseguita su carta trasparente indeformabile ha permesso di sovrapporre l'ortofoto alle tessere del mosaico e la corrispondenza è risultata ottima.

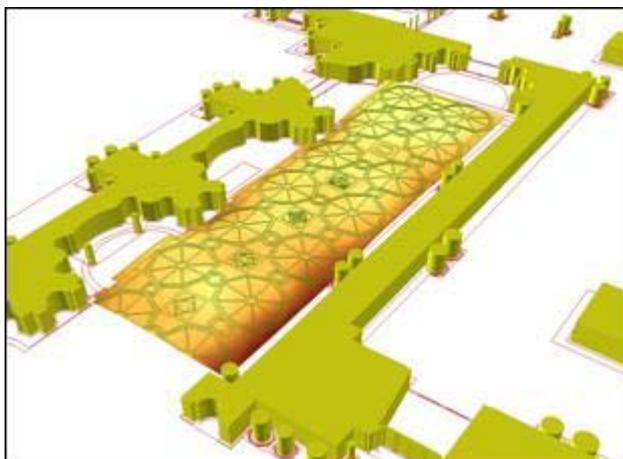


Fig. 7 Modello 3D del pavimento generato dal DTM fotogrammetrico (Fattore Z = 3x)

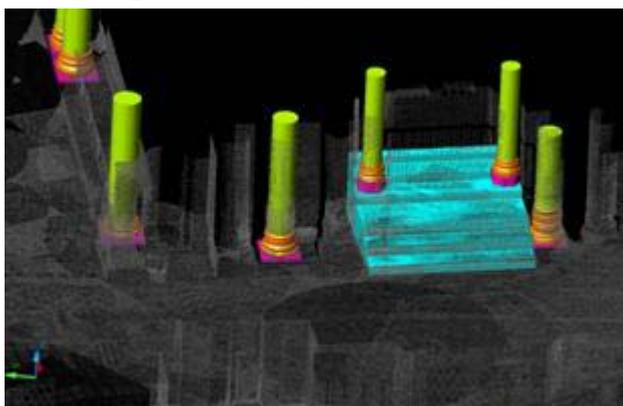


Fig. 8 Modellazione 3D integrata alle scansioni del laser HDS300

5. Ortofoto 3D digitale di tutto il mosaico pavimentale

Il successo in termini di fattibilità, l'utilità dell'ortofoto per i restauratori, la possibilità di estrarre profili in automatico della superficie fotografata, hanno visto l'estensione a tutto il pavimento delle prese fotogrammetriche. Una squadra composta sempre da tre operatori, spesso quattro, con l'aiuto del personale della Procuratoria, ha programmato le prese nell'arco dei sei mesi a cavallo del Natale, cioè da settembre 2004 ad aprile 2005, compatibilmente con l'attività religiosa e il flusso turistico. Molta parte del lavoro è ovviamente avvenuta nell'orario di chiusura della Basilica.

Le strisciate hanno seguito le indicazioni fornite dall'area test sia come ricoprimenti, sia come punti d'appoggio. Il numero complessivo dei fotogrammi acquisiti alla scala circa 1:50 forniscono un pixel a terra di circa 0.5mm. Il numero totale di fotogrammi è risultato di 1909, salvo le integrazioni necessarie, e il numero dei punti d'appoggio di 2240, assai maggiori evidentemente di quelli necessari, ma utili e indispensabili per fare valutazioni sulle precisioni conseguibili diminuendo i punti di controllo e tenendoli come punti di legame. E' iniziata la restituzione del nartece della zona nord, 103 fotogrammi con 190 punti d'appoggio, in quanto apparentemente più soggetta a movimenti del mosaico negli ultimi anni (fig. 5-8).

Il trattamento delle immagini vede l'impiego del software aggiornato Socet Set 5.2.0 della BAE Systems e la visualizzazione attraverso ArcGis. La delimitazione tra pavimento e alzati che compare nei modelli perimetrali alle murature, colonne e altro, deve essere ben determinato. Ciò avviene osservando in stereoscopia detti modelli e delimitando così la zona dove devono essere i punti che vanno a formare il DTM e di conseguenza l'ortofoto 3D.

Nel nartece è stato impiegato anche il laser scanner Leica HDS3000 sia per confronti col DTM proveniente dall'autocorrelazione di immagini, sia per avere gli alzati. E' intenzione infatti di avere una rappresentazione realistica e precisa di tutto il pavimento entro la struttura della Basilica rappresentata da un modello in elevazione coerente con la pianta e le sezioni alla scala 1:50 (Fig. 9).

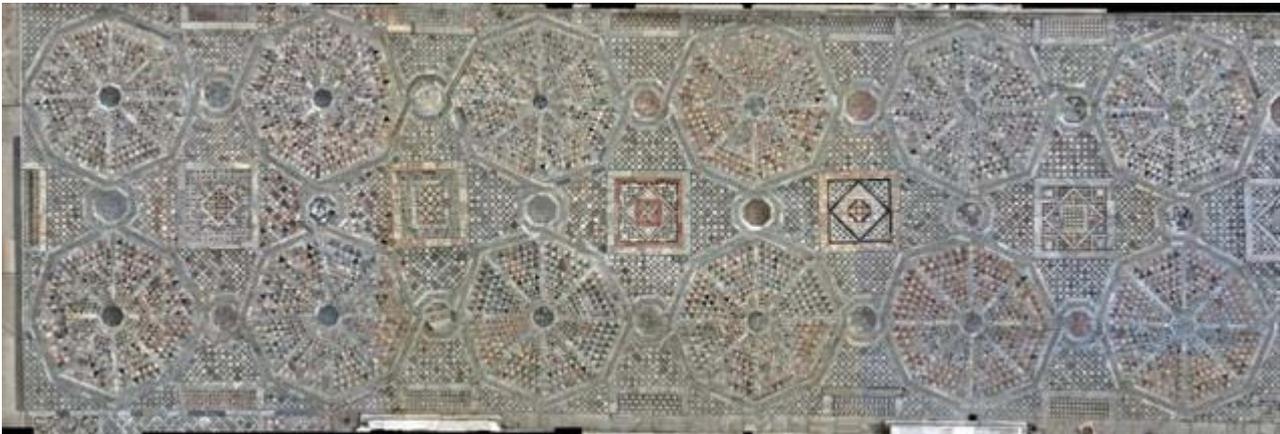


Fig. 9 Ortofoto del nartece Nord della Basilica

6. Conclusioni

L'obiettivo principale di questo lavoro è sia la conoscenza dettagliata della situazione attuale del manto musivo, sia fornire un più potente mezzo ai restauratori per i loro interventi. L'integrazione di modelli geometrici ricavati con la più moderna strumentazione in tempi e con costi compatibili con le risorse costituiscono insieme alle immagini metriche digitali la frontiera più avanzata di ricerca in molti campi di applicazione, in particolare per quelli inerenti i Beni Culturali. Lo studio e la gestione dei dati sarà organizzata in un GIS che conterrà vari tipi di informazioni geometriche, topografiche, storiche riguardanti tutti quei contenuti che possono essere utili alla conservazione del bene. Gli obiettivi futuri riguardano l'ottimizzazione della metodologia utilizzata per San Marco, esempio peraltro unico, nell'ottica di costruire una metodologia duttile ed efficace tale da ridurre in casi analoghi i costi attuali del rilievo in senso lato e di conseguenza, grazie ai nuovi mezzi rappresentativi e quantitativi, i costi di intervento manutentivo.

7. Bibliografia

- Adam, J. P., 2003. L'arte di costruire presso i Romani, Longanesi & C, Milan, Italy, vol. 10.
- Favaretto, I., Da Villa Urbani, M., 2003. Il Museo di San Marco, Marsilio, Venice, Italy.
- Marini, G., 2003. I mosaici della Basilica di Aquileia, CiscrA, Aquileia, Italy.
- Vio, E., Lepschy, A., 1999. Science and Technique of restoration of the St. Mark's Basilica, Proceedings of the international symposium of studies of Venice (16-19 May 1995), ed. Istituto veneto di scienze, lettere ed arti, Venice, Italy.