

LE NUOVE FRONTIERE DELL'ARCHEOLOGIA

DALLA FOTOGRAFIA AEREA AL TELERILEVAMENTO SATELLITARE SAR

di Nicole Dore, Jolanda Patruno

Il grande progresso tecnologico ha dato la possibilità a campi di indagine più tradizionali, come l'archeologia, di usufruire di tecnologie per trarne il massimo vantaggio ai fini di indagini preventive sul campo. È sulla scia di conquiste come il telerilevamento satellitare ottico ad alta risoluzione spaziale, che la presente ricerca si è spinta oltre tali confini, con lo scopo di indagare la tecnica polarimetrica SAR (*Synthetic Aperture Radar*).

Con il termine 'archeologia' si è soliti rivolgere la mente alla figura dell'archeologo come esploratore avventuriero. Tuttavia in questi ultimi decenni, l'archeologia è diventata molto di più. Si può pensare ad essa non solo come metodologia di scavo estensivo di più o meno grandi complessi delle antiche civiltà, ma anche come fulcro accentratore di un insieme di moderne tecnologie che permettano di condurre studi preventivi che possano essere una linea guida per indagini preliminari e per la realizzazione di piani di intervento. Il telerilevamento, in particolare, ha assunto un ruolo sempre più consistente spostando, nel corso dei decenni, il suo campo d'azione dalla semplice fotografia aerea all'utilizzo di satelliti.

In ambito archeologico, la prima foto scattata dall'alto risale al 1879, occasione in cui vennero documentati gli scavi di Persepoli. Per ciò che concerne l'Italia, la prima conquista in questo senso fu quella, sempre sul finire dell'800, di Giacomo Boni, che ottenne rilevamenti fotogrammetrici del Foro Romano e del Palatino mediante riprese da un pallone frenato del Genio Militare (Piccarreta, Ceraudo 2000). Iniziava, così, l'era del telerilevamento archeologico.

Da allora sono stati fatti numerosi passi in avanti, soprattutto nel momento in cui la risoluzione spaziale dei satelliti ha permesso di affiancare, e talvolta sostituire, la tradizionale fotografia aerea, benché l'importanza delle fotografie storiche rimanga fondamentale per lo studio del territorio interessato dalla presenza di complessi archeologici sepolti e non, in particolare per quelle zone in cui l'attività dell'uomo è stata la causa principale della progressiva scomparsa di tracce un tempo visibili.

La vera novità è stata apportata, in primis, dai sensori ottici montati a bordo di satelliti commerciali civili (IKONOS, QUICK-BIRD) che hanno messo fine alla supremazia dell'alta risoluzione spaziale dei satelliti militari i cui dati non erano divulgati tra la comunità scientifica.

Benché la più alta risoluzione spaziale dei sensori ottici abbia permesso importanti scoperte, è stata la consapevolezza dei vantaggi del radar a spingere la ricerca, iniziata nel 2009 presso l'Agenzia Spaziale Europea (ESA-ESRIN, Frascati, RM), verso l'impiego delle microonde in ambito archeologico. Tali vantaggi sono legati alla possibilità di penetrazione di nuvole e vegetazione, alla possibilità di acquisizione di informazioni in qualsiasi ora della giornata, e alla penetrazione nel terreno (in terreni aridi), caratteristiche rilevanti non disponibili tramite i sensori ottici.

In particolare, la tecnica usata nel corso della ricerca, ovvero quella polarimetrica, attraverso l'estrazione e lo studio della matrice [T3] mediante appositi software (PolSARpro, tool gratuito di ESA), mette a disposizione un ventaglio di informazioni maggiore circa i target osservati. Di questa ci si è avvalsi, con opportune elaborazioni, per l'identificazione di risposte di backscatter che potessero essere causate da resti archeologici sommersi. L'informazione polarimetrica contenuta all'interno della matrice T3, parametro matematico che definisce l'insieme complesso dei fenomeni di interazione tra il target e l'onda incidente, è data dall'intensità di tali fenomeni, successivamente codificati in una singola immagine in cui ciascun canale è associato ad un colore di banda (RGB: red, green, blu).

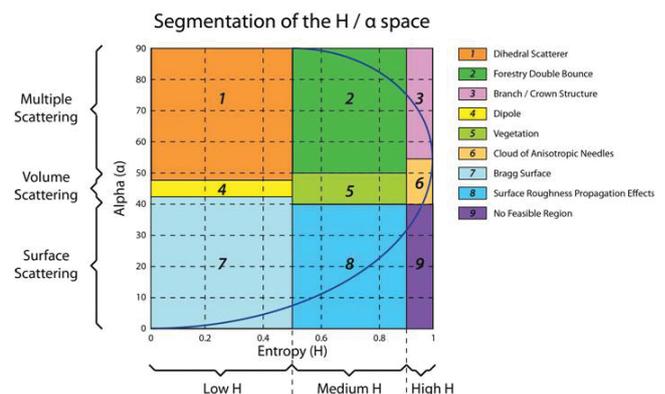


Figura 1 - Piano H/α (after Lee, Pottier 2009).

LA POLARIMETRIA SAR

I sensori polarimetrici SAR trasmettono onde elettromagnetiche o orizzontalmente (H, horizontal) o verticalmente (V, vertical) e ricevono l'energia di ritorno con polarizzazione in H o in V. In tal modo si vengono a creare 4 possibili combinazioni di trasmissione e ricezione: HH (trasmissione e ricezione orizzontale); VV (trasmissione e ricezione verticale); HV (trasmissione orizzontale e ricezione verticale); VH (trasmissione verticale e ricezione orizzontale).

I sistemi radar possono trasmettere e ricevere una, due o quattro di queste polarizzazioni e a seconda del caso si avranno le seguenti combinazioni: single polarized con HH o VV (o HV o VH); dual polarized con HH e HV, o VV e HV, o HH

e VV; alternating polarization con HH e HV, alternato con VV e VH; polarimetric con HH, VV, VH, HV.

La possibilità di disporre di dati polarimetrici è molto importante per ciò che concerne le informazioni che possono essere ottenute dal dato SAR, in quanto ciascun canale è più o meno sensibile a determinate condizioni dei target osservati, permettendo il riconoscimento di alcune caratteristiche importanti della struttura fisica delle superfici illuminate. Disporre di tutte le quattro polarizzazioni è, quindi, di aiuto per avere informazioni diverse ma complementari.

SITI TEST

I siti sui quali si è concentrata l'attenzione, sono quello etrusco romano di Vulci (VT) e il sito dauno di Arpi (FG), selezionati sulla base della documentazione disponibile quali foto aeree, modelli tridimensionali del terreno e fotorestituzioni aerofotogrammetriche (Guaitoli, 2003), documentazione, quest'ultima, che ha costituito la base, nonché il punto di partenza, per l'interpretazione del dato SAR polarimetrico nelle zone interessate dalla presenza di tracce archeologiche.

Le immagini SAR impiegate, relative al sensore polarimetrico PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) del satellite giapponese ALOS (Advanced Land Observing Satellite), sono state ordinate tramite il catalogo on line dell'ESA (EOLI-SA). L'infrequente numero di acquisizioni in modalità polarimetrica di questo sensore, tuttavia, ha impedito una scelta dei dati sulla base di alcuni importanti requisiti (ad esempio la scelta del periodo di acquisizione, estivo piuttosto che primaverile, o la scelta in base all'assenza di precipitazioni), e ha impedito analisi multitemporali che sarebbero state importanti per confronti incrociati al fine di individuare una stessa o diversa risposta in fase di interpretazione.

La catena di processamento per l'elaborazione delle immagini prevede l'estrazione di una subarea e l'applicazione di un multilook 5:1 che permettono, rispettivamente, di estrarre una porzione di terreno più piccola e più facilmente gestibile rispetto a quella acquisita dal sensore e di comprimere 5 pixel in riga e uno in colonna per rendere la geometria dei pixel (originariamente di forma allungata) più vicina alla forma quadrata.

Dopo aver preparato il dato, diverse elaborazioni sono state eseguite su entrambe le immagini al fine di estrarre informazioni non ottenibili mediante altra tipologia di dati. Parliamo, nello specifico, dei parametri di entropia (H) e angolo alpha (α). Il primo parametro serve per la determinazione del grado di casualità del processo di scattering, mentre l'angolo alpha può essere messo in relazione con parametri fisici che condizionano il processo di scattering (Lee, Pottier 2009).

Sono stati pertanto studiati questi due parametri, congiuntamente a modelli tridimensionali del terreno, in corrispondenza delle porzioni di terreno per le quali erano già conosciute tracce archeologiche mediante osservazione di fotografie aeree storiche.

ANALISI E INTERPRETAZIONE DATI

Per quanto concerne il sito di Vulci, una risposta è stata notata in corrispondenza del fossato difensivo dell'acropoli. Si parla, dunque, di una traccia archeologica in negativo che dalle foto aeree è stata identificata come anomalia da umi-

dità e che genera risposte differenti dal terreno circostante anche nei dati polarimetrici. Per interpretare al meglio questa risposta, si è tenuto conto anche degli archivi di cataloghi meteorologici sia del mese dell'acquisizione che del mese precedente a questa, al fine di dare un'interpretazione fisica appropriata a quanto osservato. Infatti, così come per lo studio di tracce da umidità nelle immagini ottiche una saturazione di acqua nel terreno impedisce alla struttura nel sottosuolo di essere intercettata, allo stesso modo l'acqua impedisce al SAR una penetrazione (seppur minima in banda L) delle microonde nel terreno.

Anche nel caso del sito archeologico di Arpi, tramite il confronto tra dati ottici e radar, georiferiti insieme alla restituzione fotogrammetrica, è stato possibile distinguere delle risposte date dal radar in corrispondenza delle tracce da umidità presenti sul sito, ovvero in corrispondenza di uno dei paleoalvei di accesso alla città. Tuttavia, le condizioni meteorologiche particolarmente sfavorevoli per via delle intense precipitazioni dei giorni precedenti a ciascuna delle acquisizioni, hanno particolarmente influito sull'interpretazione.

L'interpretazione del dato si basa sull'analisi congiunta dei valori di H, α (Fig. 1) e delle condizioni meteorologiche. Per ciò che riguarda il sito di Vulci, si è osservata una risposta differente tra la porzione di terreno in cui è supposto essere il fossato difensivo e la zona ad essa circostante. In corrispondenza della traccia del fossato il valore di H è piuttosto alto ($H = 0.68-0.71$), ma comunque più basso rispetto alle zone che lo circondano dove raggiunge un valore pari a 0.90 (Fig. 2). Il valore di α , al contrario, è basso in corrispondenza della traccia ($\alpha = 30^\circ$ ca), ed è maggiore nelle zone intorno ad essa ($\alpha = 45^\circ$ ca, Fig. 3). Passando, dunque, alla valutazione dei dati mediante il piano H/alpha, si può notare che la traccia presenta pixel che ricadono all'interno della Zona 8 del piano, mentre i pixel della porzione di terreno circostante ricadono nella Zona 5.

Ai primi è associata l'intercettazione da parte del fascio radar di una composizione differente della superficie in quanto legata a effetti di rugosità e di propagazione delle microonde; i secondi, sono associati a scattering dettati dalla presenza di vegetazione o, più in generale, da effetti di volume scattering.

L'interpretazione del dato potrebbe essere letta come una probabile penetrazione del fascio radar in corrispondenza delle zone circostanti il fossato (tenendo presente anche l'assenza di precipitazioni nel giorno dell'acquisizione e nei giorni immediatamente precedenti ad esso, ma la presenza di precipitazioni nel mese precedente), laddove si ha anche uno stato vegetale caratterizzato da inattività agricola e da erba bassa che faciliterebbe tale penetrazione. La tipologia di scattering della zona del pianoro, invece, potrebbe essere dovuta ad una intercettazione da parte del fascio radar di piccoli target (tra cui ad esempio spezzoni di tufo) presenti nel sottosuolo, mentre la zona interessata dalla traccia del fossato sarebbe caratterizzata da una mancata penetrazione delle microonde. La motivazione di ciò potrebbe essere dovuta al maggior contenuto di umidità nella cavità del fossato scavata nel banco di tufo, condizione che sembrerebbe impedire al SAR una seppur minima penetrazione nel terreno.

Nel caso di Arpi, l'osservazione delle tracce è stata resa più difficoltosa dal fatto

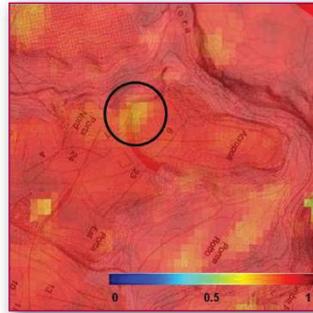


Figura 2 - Sovrapposizione del modello tridimensionale di Vulci con H. Nel cerchio probabile traccia del fossato.

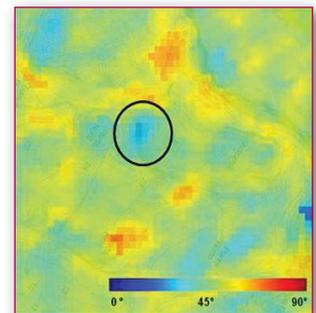


Figura 3 - Sovrapposizione del modello tridimensionale di Vulci con α . Nel cerchio probabile traccia del fossato.

che si tratta di strutture sepolte, e non vi sono all'interno del tracciato delle mura di fortificazione strutture esterne antiche che possano essere osservate in interazione con l'impulso radar.

Sono, quindi, state osservate due probabili tracce: una in corrispondenza di uno dei paleoalvei che, dall'interno dell'area urbana, si spingono per diversi metri su tutta l'area; l'altra in corrispondenza di una porzione delle mura di fortificazione della città.

Applicando sul dato SAR un filtro Lee Refined con finestra 1:5 per ridurre il rumore contenuto all'interno del segnale elettromagnetico, è stato possibile osservare il dato polarimetrico in ciascuna polarizzazione, successivamente combinate in un'unica immagine RGB con R = HH, G = HV, B = VV (Fig. 4). La sovrapposizione con la fotorestituzione del sito mette in evidenza un'anomalia del dato SAR corrispondente ad una delle tracce dei paleoalvei nella zona Sud dell'area. In questo punto la traccia raggiunge una larghezza massima di 58.15 m, dimensione apprezzabile tenendo conto delle capacità di risoluzione spaziale del sensore.

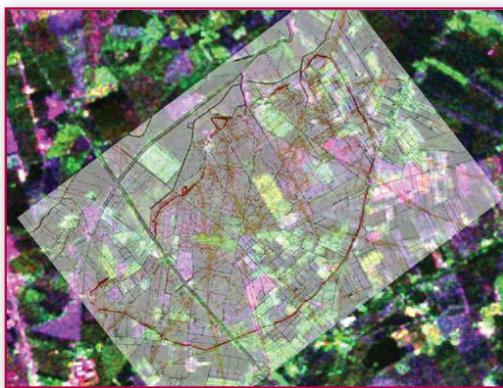


Figura 4 - Sovrapposizione della fotorestituzione con l'immagine R (HH) G (HV) B (VV) filtrata Lee Refined.

Dall'analisi delle elaborazioni effettuate tramite la sovrapposizione dei dati, si sono considerati i valori di H e α per tutto il percorso della cinta di fortificazione. In particolare, nella porzione N/W del sito, in corrispondenza della fortificazione triangolare indipendente e congiunta alla struttura principale delle mura, si è notata un'anomalia del dato SAR coincidente al lato sud-occidentale della fortificazione (Fig. 5). Esso, grazie al suo orientamento NW/SE, è probabilmente stato meglio intercettato dall'onda incidente (che guarda verso destra), a differenza del terreno circostante. L'anomalia è evidente solo per questa porzione della fortificazione, che insiste in un campo coltivato a diversa coltura rispetto a quello adiacente, nel quale ricade il restante percorso della struttura, e questo potrebbe spiegare l'evidenza dell'anomalia in relazione al tipo di vegetazione o di terreno di quel campo.

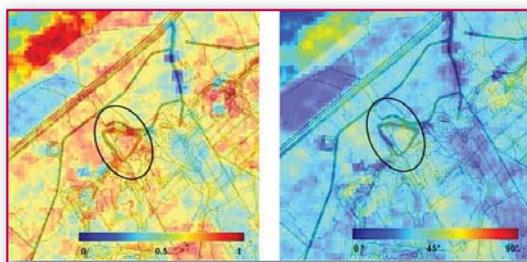


Figura 5 - Sovrapposizione dei parametri di H (sinistra) e α (destra) con la fotorestituzione del sito.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questo studio è stato quello di tentare di affiancare una nuova metodologia complementare alla più classica tipologia di ricerca delle tracce archeologiche, da anni condotta attraverso fotografie da aereo, in particolar modo storiche, e immagini ottiche da satellite ad alta risoluzione spaziale il cui contributo scientifico è ormai ampiamente consolidato.

Ci si è avvalsi, quindi, della tecnica polarimetrica SAR che, almeno potenzialmente, fornisce un contributo informativo maggiore sui target indagati. Indubbiamente, un aspetto di fondamentale importanza per il quale si è volta l'attenzione all'impiego di immagini satellitari radar è dato dall'indipendenza di questo tipo di acquisizioni dalle condizioni di copertura nuvolosa del cielo e delle condizioni di illuminazione solare sulla superficie terrestre, al contrario fortemente vincolanti nel dato ottico.

Ciò che ci si propone per il futuro è di portare avanti la ricerca in tali termini, unendo a quella qui presentata l'analisi di sensori radar a più alta risoluzione spaziale (caratteristica fondamentale per scopi archeologici) e integrandola possibilmente con indagini a terra tramite dati GPR (Ground Penetrating Radar) al fine di individuare eventuali segnali comuni, seppur a risoluzioni diverse.

BIBLIOGRAFIA

- Guitoli M. (2003), *Lo sguardo di Icaro*, Roma: Campisano Editore.
Lee J. e Pottier E. (2009), *Polarimetric Radar Imaging. From basics to applications*, CRC Press.
Piccarreta F. e Ceraudo G. (2000), *Manuale di Aerofotografia Archeologica. Metodologia, tecniche e applicazioni*, Bari: Edipuglia.

ABSTRACT

New Frontiers in Archaeology. From Aerial Photography to Satellite Remote Sensing SAR - This work is part of an ongoing PhD project held at the Area di Geodesia e Geomatica - University of Rome 'La Sapienza'. The work involves the study of archaeological sites through the analysis of polarimetric L-band data from the PALSAR sensor (on the Japanese ALOS satellite, launched in May 2006) with the aim of understanding the spectral signature of archaeological remains (above and below ground). The Italian sites of Vulci (VT) and Arpi (FG), analyzed through polarimetric imagery, were chosen according to the availability of polarimetric SAR data at the time of the study and to the different geomorphologic characteristics of the terrain, with the purpose of observing the scattering mechanisms associated to the features present in the scene.

PAROLE CHIAVE

Archeologia, telerilevamento satellitare, SAR, polarimetria.

AUTORI

NICOLE DORE
DOTTORANDA DI RICERCA
NICOLE.DORE@UNIROMA1.IT

JOLANDA PATRUNO
DOTTORANDA DI RICERCA
JOLANDA.PATRUNO@UNIROMA1.IT

Light for Art



Laser for Conservation



SOLUZIONI tecnologiche per il RESTAURO

Il **Gruppo El.En. S.p.A.** contribuisce con i suoi sistemi laser alla conservazione del patrimonio storico e artistico ormai da due decenni, proponendo soluzioni sempre più innovative, sviluppate in collaborazione con i maggiori centri di ricerca nazionali. L'obiettivo dei ricercatori del **Gruppo El.En.** è quello di fornire ai restauratori la più completa e avanzata gamma di prodotti da impiegare sia in laboratorio che in cantiere nelle più diverse e difficili condizioni di lavoro. Affidabilità, praticità, flessibilità, elevate prestazioni e la costante validazione in campo da parte dei maggiori esperti del settore della conservazione, fanno sì che i sistemi laser del **Gruppo El.En.** siano i più diffusi e vengano impiegati nei più importanti cantieri di restauro in Italia e all'estero.