

N° 6
2009

Rivista bimestrale - anno 13 - Numero 6/09 - Spacc. in abb. postale 7019 - Filiale di Pavia

GEO MEDIA

La prima rivista italiana di geomatica e geografia intelligente

► **Laser scanner: stato attuale e future applicazioni**

► **Le statue Moai dell'Isola di Pasqua ricostruite in 3D**

► **Mostra: Un tesoro ritrovato, dal rilievo alla rappresentazione**

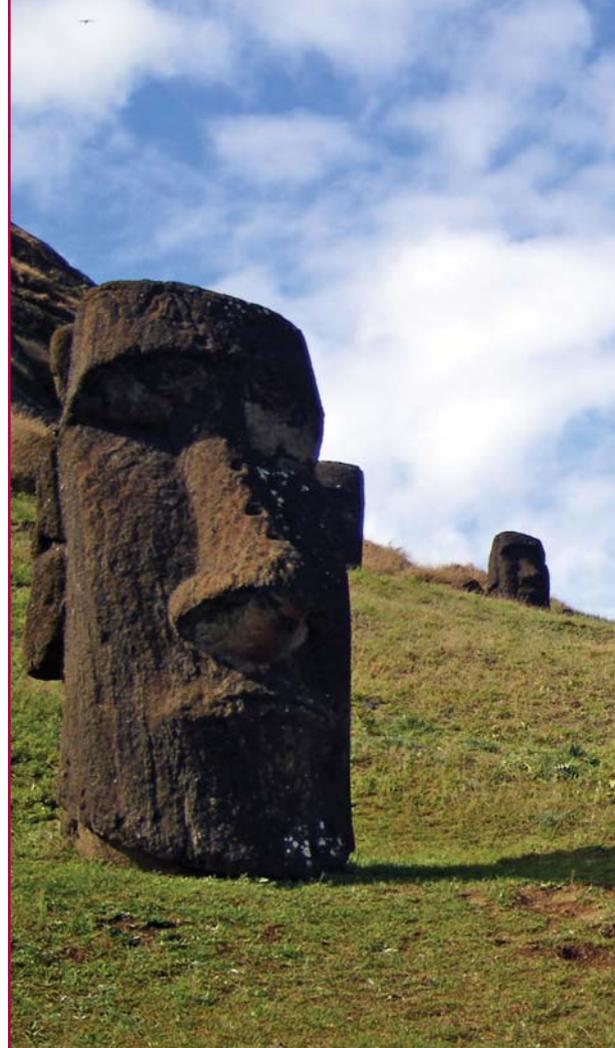
► **Un report dalla Conferenza ASITA 2009**

► **OpenStreetMap: la rivoluzione delle mappe libere**

Ricostruzione 3D e caratterizzazione dei materiali delle statue Moai dell'Isola di Pasqua

di M. Marsella, A. Sonnessa, L. Orlando,
P. Soddu, C. Margottini, D. Spizzichino

Tra il 15 e il 27 luglio 2008, un gruppo di esperti formato da ricercatori del Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade (DITS) della Sapienza Università di Roma e della Sezione di Roma dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) si è recato presso l'Isola di Pasqua, in Cile, per svolgere una campagna di indagini finalizzate allo studio di statue Moai. Il lavoro ha riguardato principalmente la raccolta di dati topografici e geofisici da utilizzare rispettivamente per la ricostruzione tridimensionale e per la caratterizzazione del materiale costituente le statue, al fine di valutarne lo stato di conservazione. La campagna è parte del progetto scientifico-culturale internazionale "Moai al Mondo", coordinato dalla Fondazione Onlus Marenostrum.



Le attività effettuate durante la campagna scientifica "Moai al Mondo-Rapa Nui 08" si inquadrano nell'ambito del progetto scientifico-culturale internazionale "Moai al Mondo", coordinato dalla Fondazione Marenostrum Onlus e patrocinata dalla Louis Vuitton Malletier. Il progetto ha come prima finalità la diffusione in Europa e nel mondo del patrimonio culturale, identitario e archeologico dell'Isola di Pasqua (Rapa Nui), di cui le statue Moai rappresentano la massima espressione. Parallelamente, lo stesso progetto si propone di promuovere strategie di lungo periodo per la raccolta di dati tecnici e scientifici orientati alla definizione di criteri utili alla conservazione di manufatti di elevato valore archeologico che, come le statue Moai, sono situati in aree remote e soggetti a degradazione a causa di agenti atmosferici. Le indagini eseguite durante la campagna sono state utilizzate per individuare la statua più idonea ad essere trasportata a Parigi dove ne è prevista l'esposizione presso il museo del Louvre. Sulla base dei dati raccolti, che

hanno consentito di valutare l'accessibilità al sito, le caratteristiche morfologiche e le condizioni di conservazione di quattro statue Moai selezionate tra le oltre 800 presenti sull'isola, è stato realizzato uno studio di fattibilità per definire le condizioni di trasporto. Il contributo del Gruppo di Geomatica e Rilievo alla campagna scientifica ha incluso il rilievo topografico di dettaglio delle statue e della zona immediatamente circostante attraverso la raccolta di dati tridimensionali ad alta risoluzione con strumentazione laser scanner e il posizionamento di precisione dei sensori utilizzati per le indagini geofisiche effettuate sulle statue. I dati topografici raccolti hanno permesso la generazione di modelli tridimensionali numerici delle statue utili sia per scopi di documentazione, che per la progettazione della cassaforma da realizzare per effettuare nelle massime condizioni di sicurezza il trasporto della statua Moai selezionata. I dati geofisici hanno permesso la caratterizzazione geometrica e meccanica delle statue utile a questo scopo.



Figura 1 (in alto) - Esempi di statue Moai.



Figura 2 (a destra) - L'isola di Pasqua: Rapa Nui.

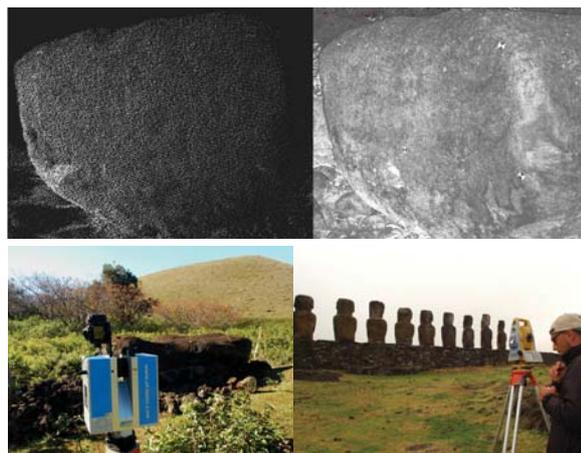


Figure 3a (a sinistra) e 3b (in basso) - Sito di rilievo ed esempio di dati laser acquisiti con le diverse strumentazioni.

Rapa Nui: caratterizzazione geomorfologica e principali problematiche connesse alla conservazione

L'Isola di Pasqua (Rapa Nui, "Isola Grande") è parte della dorsale oceanica, una catena ininterrotta di vulcani sottomarini e isole che attraversa l'Oceano Pacifico.

L'isola, di forma vagamente triangolare, (lunga circa 24km e con una superficie di 166km²) deriva dalla fusione dei flussi lavici di tre apparati. Le vulcaniti sono il prodotto principale dell'attività di tre crateri principali (Rano Kau, Terevaka, Poike) che formano la struttura principale dell'isola (Pleistocene superiore). La maggior parte del materiale affiorante è costituito da flussi basaltici (hawaiite), lave, fall piroclastici e tufi palagonitici (hyaloclastiti).

Le statue Moai dell'Isola di Pasqua, dichiarate patrimonio mondiale dell'umanità dall'UNESCO, costituiscono la più grande espressione culturale, sociale e religiosa degli abitanti di Rapa Nui oltre ad essere un manifesto della propria identità geografica e antropologica. Sull'isola sono stati censiti 887 monoliti, tutti scolpiti tra l'ottavo ed il quindicesimo secolo d.C., e principalmente costituite da tufi palagonitici provenienti da una unica cava (Ranu Raraku) situata a Nord-Est dell'Isola. Archeologi ed esperti che hanno esaminato recentemente le statue Moai, hanno riscontrato che la maggior parte di esse sono sottoposte ad un severo processo di alterazione causato principalmente da spray marino e da fattori meteorologici che hanno prodotto l'alterazione dei minerali primari dei tufi.

La campagna scientifica

La campagna del luglio 2008 è stata indirizzata alla raccolta di dati utili alla realizzazione di un'approfondita analisi geometrica e costitutiva dei manufatti. Per quanto riguar-

da gli aspetti geometrici, i dati topografici tridimensionali, caratterizzati da accuratezze dell'ordine di 10^{-2} - 10^{-3} metri, sono stati utilizzati per definire le dimensioni, le volumetrie e i pesi delle statue selezionate. Per caratterizzare il materiale sono stati raccolti dati relativi alla composizione (caratteristiche petrografiche e mineralogiche), allo stato di alterazione interno attraverso lo studio delle proprietà geofisiche e geomeccaniche e, inoltre, sono state effettuate indagini qualitative sullo stato di degrado ed alterazione dello strato superficiale.

Il rilievo tridimensionale è stato effettuato su tre statue Moai utilizzando due tipologie di strumentazione laser scanner con diverse caratteristiche di precisione e risoluzione: lo strumento Riegl 210i, utilizzato per realizzare il rilievo dell'intera statua e dell'area circostante con lo scopo principale di gestire gli aspetti di rimozione della statua e protezione durante il trasporto, e lo strumento Z+F Imager 5006, che ha permesso di raccogliere dati utili all'individuazione di aree particolarmente deteriorate o di piccole discontinuità, indice di possibili lesioni o superfici di debolezza dell'ammasso. In figura 3 viene mostrato un sito di rilievo ed un esempio di dati laser della stessa porzione di una statua Moai acquisiti con le due diverse strumentazioni.

Le nuvole di punti tridimensionali ad alta densità raccolte mediante gli strumenti laser scanner, unitamente alla misura con stazione totale integrata dei punti di legame tra le diverse scansioni utili a migliorare la procedura di coregistrazione, hanno permesso di ricostruire modelli virtuali di elevata qualità delle statue indagate.

Le statue Moai prese in esame – identificate sull'isola dagli esperti partecipanti alla campagna di indagini in accordo con le autorità locali – sono ubicate in diverse aree e sono state selezionate principalmente a seconda delle dimensioni ottimali per il trasporto e valutando le condizioni generali di alterazione. Inoltre, si è anche tenuto conto della collocazione sul terreno e dell'accessibilità al sito, questo in modo da favorire le operazioni di trasporto. Le aree circostanti le statue sono state rilevate allo scopo di ottenere DTM (*Digital Terrain Models*) da utilizzare per il riposizionamento delle statue, alla fine delle operazioni, nella loro esatta collocazione originale, come previsto dal progetto.

I singoli rilievi topografici sono stati inquadrati in un riferimento locale e contestualmente collegati tramite GPS ad un punto di riferimento stabilito sull'isola per la georeferenziazione dei dati nel sistema UTM-WGS84.

La strumentazione geomatica e i prodotti ottenuti

Le attività di rilievo sono state effettuate utilizzando i seguenti sensori topografici ad alta risoluzione:

- due laser scanner per la ricostruzione dei modelli numerici 3D (il Riegl Z210i per l'acquisizione dei punti necessari alla costruzione dei DTM, e lo Z+F Imager 5006 per la ricostruzione delle statue MOAI) (Tabella 1);
- una stazione totale robotizzata (Topcon GPT-9001A IS 03) per stabilire la rete di riferimento locale e misurare la posizione dei sensori sismici e dei tracciati del georadar;
- due ricevitori GPS (Topcon GR3) per la georeferenziazione dei dati.

	Riegl Laser Scanner Z210i	ZF Laser Scanner Imager 5006
Field of view	vertical: 90° horizontal: 360°	vertical: 310° horizontal: 360°
Maximum range	1000 m	79 m
Digital camera	External calibrated mount	External calibrated mount
Resolution range	5 mm	1 mm
Resolution	0.002°	0.0018°± 0.007°
Beam divergence	0,25 mrad	0.22 mrad
Data acquisition rate	12.000 pixel/s	500,000 pixel/s

Tabella 1 - Caratteristiche principali degli strumenti laser adottati.

Dalla elaborazione dei dati acquisiti sono stati estratti i modelli numerici tridimensionali di tutte le statue Moai oggetto di studio, a partire dal filtraggio della nuvola di punti grezzi fino ad arrivare alla mesh triangolare. Alcuni esempi sono mostrati in figura 4 e 5.

Per la costruzione del modello della statua mostrata in Figura 4c, sono state utilizzate 11 scansioni acquisite da 5 posizioni differenti. I punti di ciascuna scansione sono stati misurati ad una interdistanza media di circa 5mm. Allo scopo di verificare la qualità del modello tridimensionale ottenuto si è utilizzata una procedura automatica di confronto tra la superficie ottenuta con il laser e la posizione di 124 punti materializzati su di essa (figura 6) e determinati con precisione millimetrica utilizzando la stazione totale. I risultati ottenuti sono sintetizzati nella tabella 2 e mostrano discrepanze dell'ordine di 0.01m tra i punti di controllo e la superficie.



Figura 4 a-b-c - Differenti viste dei modelli 3D estratti dai dati laser.

Punti di Controllo	124
Media (m)	-0,014
DevStd (m)	0,014
Errore Max (m)	0,028
Errore Min (m)	-0,043
Punti all'interno di +/- (1 * DevStd)	75 (60.5%)
Punti all'interno di +/- (2 * DevStd)	122 (98.4%)
Punti all'interno di +/- (3 * DevStd)	123 (99.2%)

Tabella 2 - Sintesi dei risultati ottenuti.

Caratterizzazione del materiale

Allo scopo di impostare un organico programma di ricerche finalizzato alla comprensione dei meccanismi e processi di alterazione e degrado delle statue Moai – e di conseguenza fornire alle autorità locali supporto tecnico e scientifico per la conservazione dell'identità di Rapa Nui – la campagna ha incluso attività di tipo geologico-geofisico.

La caratterizzazione dei materiali è stata sviluppata attraverso investigazioni in-situ costituite da sopralluoghi ed analisi geologico-tecniche, indagini geofisiche, raccolta di campioni di roccia nella cava di Ranu Raraku da analizzare in laboratorio e indagini geofisiche.

Le indagini geofisiche (rilievi di tomografia sismica ad alta risoluzione e profili georadar) adottate per la caratterizzazione geometrica e meccanica delle statue si sono avvalse dei rilievi geomatrici al fine di rilevare con accuratezza la posizione dei sensori di misura sulla statua Moai. Su ogni statua è stata inizialmente eseguita un'indagine georadar in quanto più speditiva ed indicativa in prima approssimazione dello stato di qualità dell'ammasso costituente la statua. Sulle statue ritenute più idonee è stata impiegata la tomografia sismica che, a fronte di informazioni più accurate, risulta più onerosa sia per quanto riguarda la fase di acquisizione che per quella di elaborazione dei dati.

Il metodo georadar, che si basa sull'analisi del segnale riflesso e diffratto delle onde elettromagnetiche, permette di ricostruire le geometrie interne del manufatto con una risoluzione – per le frequenze utilizzate – di 5-10cm. Nel caso specifico, è stato impiegato lo strumento dell'IDS (Ingegneria dei Sistemi) equipaggiato con antenne da 900 e 2000MHz.

Dopo aver eseguito dei test per definire le frequenze ottimali delle antenne in funzione del tipo di materiale da investigare, si è deciso di impiegare la sola antenna da 900MHz in quanto forniva un buon compromesso tra spessore investigato e risoluzione ottenibile, rispondendo quindi ai requisiti richiesti. L'antenna da 2000MHz, a causa della scarsa penetrazione e rugosità della superficie dei Moai, non è stata ritenuta idonea all'obiettivo dello studio. La scansione delle tracce georadar è avvenuta tramite ruota metrica, mentre i punti estremi del profilo sono stati posizionati attraverso la misura con stazione totale delle coordinate. La tomografia sismica si basa sulla lettura dei tempi di primo arrivo delle onde sismi-



Figura 5 - Differenti viste dei modelli 3D estratti dai dati laser.

che trasmesse. Attraverso tecniche di inversione di tipo topografico, si ricostruisce la distribuzione interna delle velocità delle onde di compressione (P). L'indagine è stata eseguita con l'utilizzo dello strumento GEODE della EG&G Geometrics con conversione A/D a 24-bit. Lo strumento è stato equipaggiato con 24 canali, di cui il primo utilizzato come trigger. Come sensori sono stati utilizzati degli accelerometri con frequenza di picco di 7KHz e come sorgente un martello equipaggiato con piezoelettrico. Per evitare danneggiamenti alla statua la piastra metallica della sorgente e i sensori sono stati accoppiati al manufatto tramite l'utilizzo di cerotti medici.

I punti di scoppio e ricezione sono stati materializzati con appositi target rilevati per via topografica con un'accuratezza superiore a 10^{-2} metri. L'accuratezza della georeferenziazione dei target migliora notevolmente la qualità dei risultati dell'inversione dei dati di tomografia sismica, in quanto riduce i problemi di convergenza della soluzione in fase di inversione dei dati fornendo una ricostruzione delle velocità più affidabile.

Conclusioni

L'impiego di strumentazione geomatica ad alta risoluzione spaziale ed elevata precisione di misura ha permesso di realizzare per la prima volta il rilievo topografico di dettaglio di alcune statue Moai, contribuendo alla raccolta



Figura 6 - Confronto tra i dati acquisiti tramite laser scanner e i punti rilevati con stazione totale.

di dati preziosi per la valutazione delle caratteristiche geometriche e dello stato di conservazione superficiale di manufatti di elevato valore archeologico. Tali dati, insieme ai risultati delle indagini geologiche e geofisiche, hanno permesso di individuare le statue Moai che presentando caratteristiche più favorevoli di resistenza meccanica, alterazione dei materiali ed ingombro, risultano idonee ad essere

mobilizzate temporaneamente nell'ambito di iniziative finalizzate alla diffusione della cultura e del patrimonio artistico dell'isola di Rapa Nui. **G**

Ringraziamenti

Si ringraziano per il supporto tecnico e la disponibilità della strumentazione utilizzata durante la campagna "Moai al Mondo - RapaNui 08":

- L'associazione Marenostrum e l'ing. Orlando Pandolfi, responsabile del progetto "Moai al Mondo"
- Geotop srl, che ha messo a disposizione i ricevitori GPS Topcon GR3 e la stazione totale Topcon GPT-9001A IS 03;
- DeltaG srl, che ha fornito lo strumento Z+F Laser Scanner Imager 5006;
- Il Dipartimento di Idraulica Trasporti e Strade (DITS) de "La Sapienza" Università di Roma, che ha messo a disposizione il Riegl Laser Scanner Z210;
- Il prof. Ettore Cardarelli dell'Area di Geofisica del DITS per il supporto nella elaborazione dei dati della tomografia sismica

In particolare, siamo grati a Massimiliano Toppi, Massimo Dottori (Geotop) e Paolo Girardi della 3D Target per la loro disponibilità ed assistenza.

Abstract

Integration of advanced geomatic and geophysics surveys for characterization of Moai statues in Easter Island (Chile)

Between 15 and 27 July 2008 a field campaign aimed at collecting topographical and geophysical data useful for geometric reconstruction and material characterization of a Moai Statue was carried out on the Ester Island (Rapa Nui, Chile). The scientific activity, conducted by a team of researchers of Sapienza University of Rome (DITS) and of the Institute for Environmental Protection and Research (ISPRA), is part of the "MOAI AL MONDO" Project, coordinated by Marenostrum Foundation and sponsored by Louis Vuitton Malletier, which promote the dissemination of the cultural and archeological heritage of Easter Island's people to Europe and to the world.

Autori

MARIA MARSELLA, ALBERICO SONNESSA
Area di Geodesia e Geomatica – Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade – "La Sapienza" Università di Roma
[MARIA.MARSELLA][ALBERICO.SONNESSA]@UNIROMA1.IT

LUCIANA ORLANDO, PIERLUIGI SODDU
Area di Geofisica – Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade – "La Sapienza" Università di Roma
LUCIANA.ORLANDO@UNIROMA1.IT
PIERLUIGI.SODDU@PROTEZIONECIVILE.IT

CLAUDIO MARGOTTINI, DANIELE SPIZZICHINO
ISPRA
[CLAUDIO.MARGOTTINI][DANIELE.SPIZZICHINO]@ISPRAMBIENTE.IT