GENERAZIONE DI UN MODELLO 3D DEL VESUVIO (NAPOLI) MEDIANTE INTEGRAZIONE DI DATI LASER A SCANSIONE TERRESTRE E FOTOGRAMMETRIA DIGITALE AEREA

Massimo FABRIS (*), Arianna PESCI (**), Paolo BALDI (*), Alessandra BORGHI (***), Nicola CENNI (*), Dario CONFORTI (****), Prospero DE MARTINO (*****), Fabiana LODDO (**), Folco PINGUE (*****), Livio PINTO (***)

(*) Dipartimento di Fisica – Settore Geofisica, Università di Bologna, Viale Berti Pichat, 8 – 40127 Bologna
(**) INGV – Sezione di Bologna, Via Donato Creti, 12 – 40128 Bologna, e-mail: pesci@bo.ingv.it
(***) DIIAR – Politecnico di Milano, Piazza Leonardo Da Vinci, 32 – 20133 Milano
(****) DCA, Via Resegone, 34 – 20050 Milano
(*****) INGV – Sezione di Napoli, Via Diocleziano, 328 – 80124 Napoli

Riassunto
Nel lavoro vengono analizzati ed integrati tre modelli digitali caratterizzati da risoluzione e precisione differenti, relativi al vulcano Vesuvio (Napoli): un DTM ottenuto dalla digitalizzazione della cartografia relativa ad un'ampia zona del Golfo di Napoli, un secondo DTM prodotto mediante un rilievo aerofotogrammetrico effettuato nel settembre 2004 in scala media 1:8000 relativo alla parte sommitale del Mt. Somma, ed un terzo ottenuto da una serie di scansioni terrestri effettuate nel maggio 2005 con il *laser scanner ILRIS 3D*, relativo alle pareti interne del cono.

Abstract
In the work are analyzed and integrated three digital models of the Vesuvius volcano (Naples) characterized by different resolution and precison: a DTM obtained from digitalization of cartography of the wide zone of the Naples Gulf; a second model produced by means of aerial photogrammetric survey performed on september 2004 at 1:8000 mean scale, relative to the Mt. Somma caldera; a third DTM obtained by several terrestrial scans of the internal slope of the cone, performed on may 2005 with the laser scanner ILRIS 3D.

Introduzione
La fotogrammetria digitale aerea, ampiamente utilizzata per l'estrazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM), è una metodologia di rilievo che permette di ottenere grandi quantità di dati in tempi brevi e con precisioni elevate; tuttavia, nel caso di superfici caratterizzate da forte pendenza o di pareti sub-verticali, il dato che si ottiene può non essere sufficientemente rappresentativo della reale morfologia del terreno a causa delle condizioni geometriche di acquisizione. In questi casi è necessario integrare il DTM fotogrammetrico con dati ottenibili tramite altre tecniche quali, per esempio, la metodologia *laser* a scansione terrestre, che può venire utilizzata per il rilievo di precisione di porzioni di territorio. Un problema di questo tipo si è posto nella produzione di un modello digitale di precisione dell'edificio vulcanico del Vesuvio, che consiste di una vecchia struttura, il Mt. Somma, la cui caldera, con diametro massimo di 5 km, ha subito nel tempo diversi collassi; al centro di questa è posizionato il cono del Vesuvio, che raggiunge una quota di circa 1100 metri sul livello del mare. Il bordo del cratere ha un diametro medio di 700 m, con una profondità di 300 m. Infine, per completare la rappresentazione dei rilievi aerofotogrammetrico e *laser scanning* terrestre è stato utilizzato un DTM prodotto tramite digitalizzazione della cartografia a scala 1:10000 relativa ad un'ampia porzione del Golfo di Napoli.

Il modello fotogrammetrico

Il rilievo aerofotogrammetrico (gentilmente messo a disposizione dalla Nuova Avioriprese srl di Napoli) è stato effettuato il 9 settembre 2004 con camera *Leica* RC30. La scala media dei fotogrammi è circa 1:8000; sono state utilizzate 5 diapositive digitalizzate con risoluzione di 1800 dpi che comporta una dimensione del *pixel* a terra di circa 15 cm. L'orientamento delle immagini è stato realizzato con il software *Socet Set* v. 5.3; a tale scopo sono stati misurati a posteriori, con la metodologia GPS, 17 punti fotografici d'appoggio naturali (GCP) individuati in aree stabili e ben visibili sulle immagini del modello. L'estrazione automatica del DTM è stata effettuata su una griglia di passo 2.5 m per l'area esterna al cono e zone limitrofe e su una griglia di passo 0.5 m relativamente alle pareti interne del cono stesso. Il DTM così prodotto è stato manualmente corretto nelle zone di scarsa correlazione adattando le curve di livello al modello stereoscopico (soprattutto in corrispondenza a pendii ripidi e zone d'ombra interne al cratere). La figura 1a visualizza il DTM finale (editato), mentre nella figura 1b viene riportata la corrispondente ortofoto.

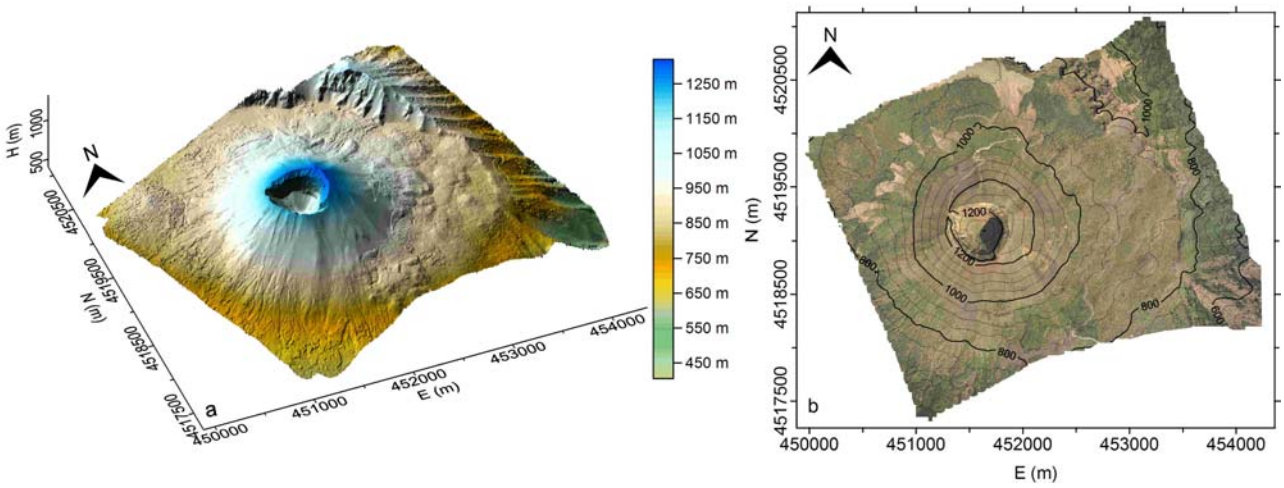

Figura 1 – a) Rappresentazione tridimensionale del DTM fotogrammetrico; b) Ortofoto digitale

Il modello *laser scanning*

Il rilievo *laser scanning* terrestre è stato effettuato nel maggio 2005 mediante l'utilizzo del *laser scanner ILRIS 3D*, acquisendo 20 nuvole di punti della porzione interna al cratere a partire da quattro differenti punti di stazione la cui posizione è stata misurata con la metodologia GPS nello stesso sistema di riferimento dei punti fotografici d'appoggio del rilievo aerofotogrammetrico (figura 2). Durante la campagna di misura, per motivi di sicurezza, non è stato possibile accedere alla parte settentrionale della sommità del cono; ciò ha generato alcune lacune nelle nuvole di punti.
Le singole scansioni sono state realizzate mantenendo il più possibile la perpendicolarità tra il raggio *laser* e la parete colpita, in modo da evitare eccessive interdistanze tra *laser* e superficie da rilevare. Considerando le distanze in gioco, è stato possibile mantenere la dimensione dell'impronta in un intervallo compreso tra 6 e 12 cm (Pesci et al., 2006). L'allineamento delle singole scansioni è stato effettuato con il software *Polyworks*: inizialmente sono stati individuati e misurati punti omologhi su scansioni successive, stimando i parametri di roto-traslazione iniziali che portano la seconda scansione sulla prima; successivamente sono stati applicati gli algoritmi ICP (*Interactive Closest Points*) che permettono di migliorare l'allineamento diminuendo media e deviazione standard dei residui (ottenuti dal confronto delle parti comuni delle scansioni): complessivamente è stato possibile ottenere una deviazione standard globale di allineamento pari ad 8 cm. In questo modo sono stati ottenuti dei parametri di roto-traslazione che sono stati applicati per riportare tutte le scansioni acquisite nel sistema di riferimento adottato per la prima. L'ultimo passo della procedura ha permesso la co-registrazione della nuvola di punti rispetto ad un sistema di riferimento esterno introducendo le coordinate GPS dei punti di stazione. Il modello così ottenuto è stato

consolidato eliminando i punti ridondanti nelle aree di sovrapposizione ed estraendo una *mesh* triangolata con lato medio di 5 cm; la riduzione dei dati ha permesso comunque un'appropriata rappresentazione digitale della superficie per la generazione di profili, sezioni, calcolo dei volumi, ecc.

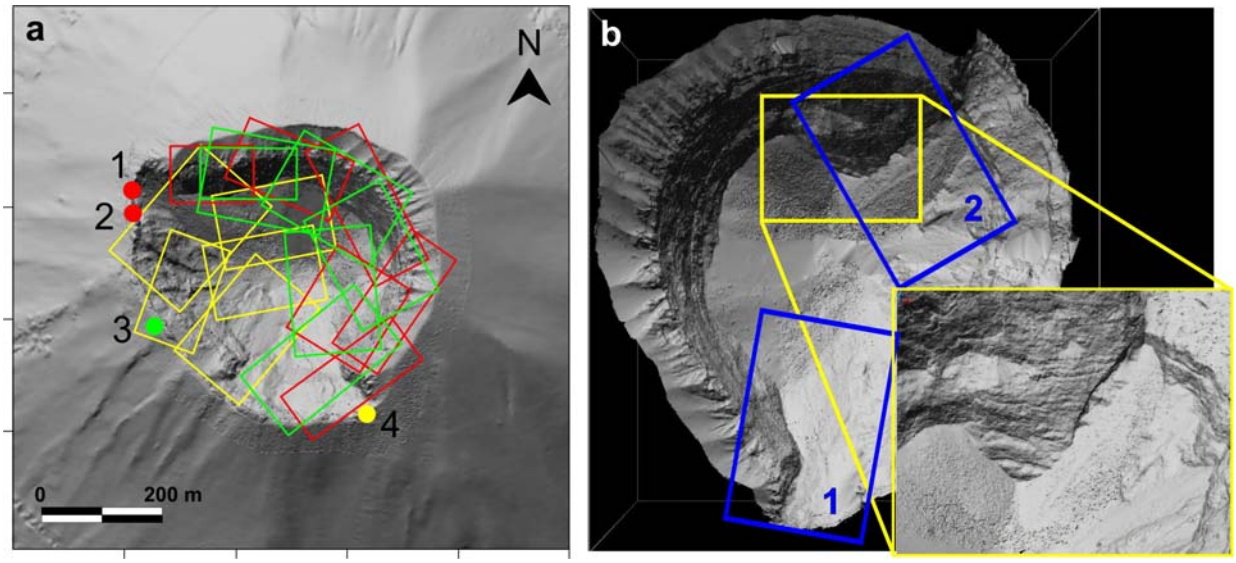

Figura 2 – a) Schema delle posizioni di scansione e coperture delle singole acquisizioni; b) Modello finale triangolato (lato medio di 5 cm)

L'integrazione dei modelli digitali

La fotogrammetria digitale aerea ed il *laser scanning* terrestre sono metodologie di rilievo caratterizzate da differenti scale di rappresentazione e sono influenzate da differenti sorgenti di errore: il rilievo aerofotogrammetrico di aree caratterizzate da superfici molto corrugate e versanti ripidi, è fortemente influenzato dalla qualità delle immagini e dalla presenza di ombre (Baldi et al., 2005). In particolare, la presenza di ombre può ridurre od eliminare la visibilità di alcune aree e quindi comprometterne la restituzione tridimensionale: infatti solo un sofisticato filtraggio differenziale delle immagini permette di equalizzare in modo ottimale i toni di grigio; comunque questa metodologia non permette la descrizione dettagliata di pareti sub-verticali a causa delle vincolanti condizioni geometriche di acquisizione. D'altro canto il *laser scanner* terrestre è limitato dal *range* di acquisizione, generalmente inferiore a 2 km (per basse riflettività, come in aree vulcaniche, raramente si raggiunge il chilometro) (Teza et al., 2005); anche questa metodologia richiede di operare con geometrie ottimali, al fine di evitare zone d'ombra o comunque non correttamente illuminate dal fascio *laser*.

I due DTM sono stati uniti per superare i limiti delle due tecniche e ottenere un modello completo del cono e dell'area circostante. Inizialmente è stato effettuato un allineamento dei due roto-traslando i punti ottenuti dalle acquisizioni con il *laser scanner* sul DTM fotogrammetrico tramite il software *Polyworks* (applicando la stessa procedura adottata per l'allineamento delle singole scansioni): dopo un primo confronto, le aree caratterizzate da grandi differenze sono state escluse dal calcolo dei parametri di trasformazione. L'allineamento tra le due serie di dati ha fornito una deviazione standard dei residui di circa 20 cm. Dopo aver effettuato la co-registrazione, l'integrazione ha portato ad assumere, per la generazione del modello finale, i dati *laser* come riferimento nelle aree caratterizzate dalla sovrapposizione tra i due *dataset* (maggiore risoluzione e precisione) e i dati fotogrammetrici solo in corrispondenza alle lacune del DTM acquisito con *laser* e per le parti esterne all'edificio vulcanico. Il DTM finale ottenuto dall'integrazione risulta caratterizzato da una risoluzione variabile da alcuni a 50 centimetri, per l'interno del cono e il suo bordo, 2.5 metri nella parte esterna. La parte circostante l'edificio vulcanico è stata descritta tramite

l’utilizzo del DTM estratto dalla digitalizzazione della cartografia preesistente e co-registrato nello stesso sistema del modello ad alta precisione.

Utilizzo dei DTM

Il confronto diretto e completo tra i DTM *laser scanning* e fotogrammetrico fornisce residui che presentano una media di -0.36 m e deviazione standard di 3.17 m.

La distribuzione planimetrica dei residui (figura 3) conferma la presenza di valori maggiori in corrispondenza alle pareti sub-verticali e nelle zone d’ombra dove il DTM fotogrammetrico non fornisce risultati accettabili.

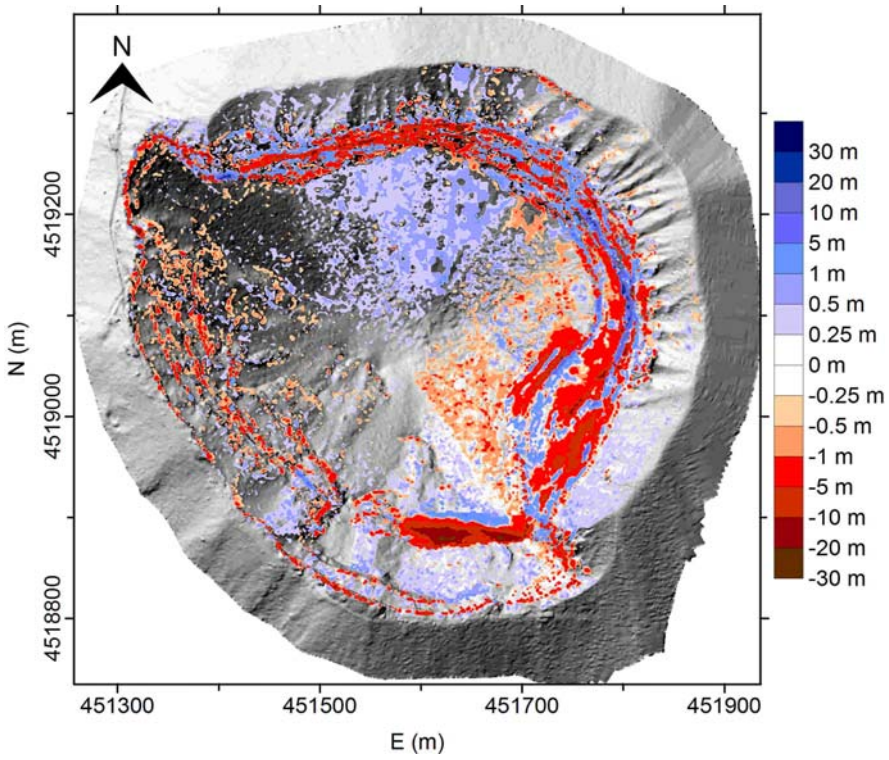

Figura 3 – Confronto tra i DTM fotogrammetrico e laser scanning

Si consideri il confronto in corrispondenza a due differenti aree (indicate come 1 e 2 in figura 2b): la prima è caratterizzata da lacune di notevoli dimensioni nei dati *laser* (figura 4a), mentre il DTM fotogrammetrico risulta completo (figura 4b).

In quel tratto, inoltre, la parete interna del cono non presenta inclinazioni accentuate e le condizioni di visibilità sulle immagini sono buone; il DTM fotogrammetrico ha fornito precisioni mediamente compatibili con la scala media del fotogramma. L’integrazione dei due DTM (figura 4c) ha permesso quindi di riempire le lacune dei dati *laser* con buona precisione.

Diversa è risultata invece la situazione in corrispondenza dell’area 2 di figura 2b: in questo caso i dati laser non presentano lacune significative (figura 4d), mentre i dati fotogrammetrici non hanno fornito precisioni compatibili con la scala media del fotogramma (figura 4e); le immagini presentano una zona d’ombra piuttosto consistente (figura 1b) proprio in corrispondenza a pareti sub-verticali interne al cono. Il fallimento della correlazione automatica ha fornito risultati insoddisfacenti nell’estrazione del DTM, ma anche l’applicazione delle procedure di *editing* ha impedito la generazione di un modello accurato creando evidenti artefatti (figura 4e); l’integrazione dei due modelli ha evidenziato la scarsa precisione del DTM fotogrammetrico (figura 4f). In questo caso, quindi, nella generazione del DTM finale sono stati considerati solo i dati *laser*. Il confronto dei dati in aree che non presentano problemi per ambedue i rilievi, indicano differenze con media di 1 cm e deviazione standard di 22 cm.

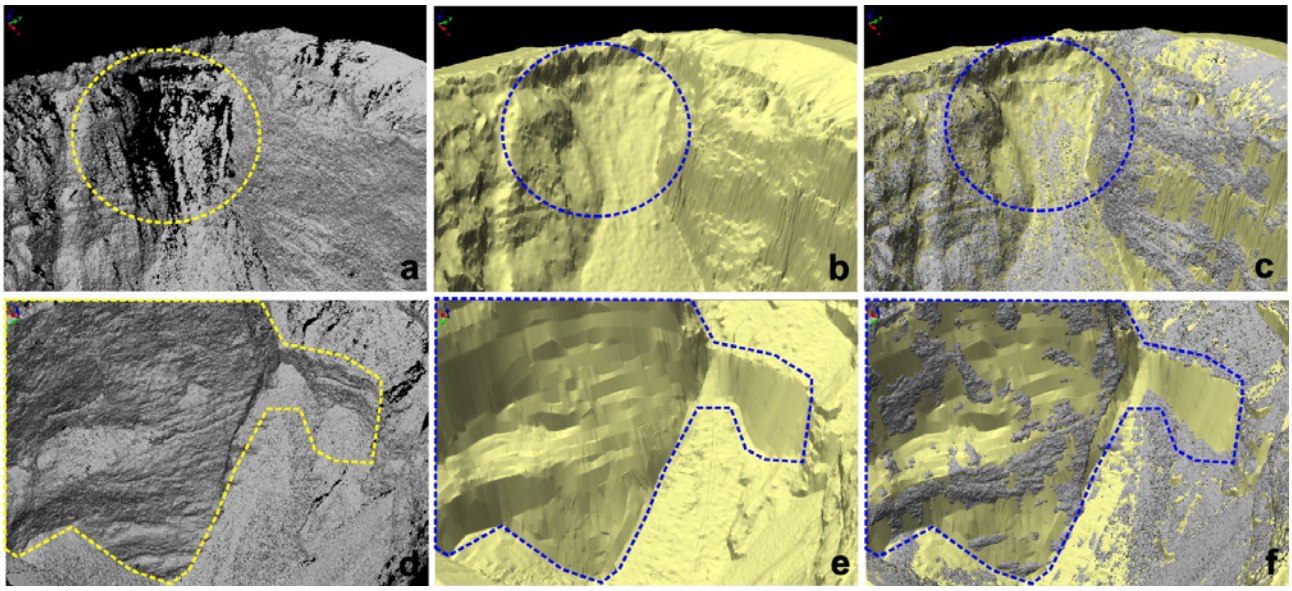

Figura 4 – a) Lacune presenti nei dati laser (area 1 di figura 2b); b) DTM fotogrammetrico; c) Integrazione dei due set di dati; d) Completezza dell'informazione dei dati laser (area 2 di figura 2b); e) Artefatti generati nel DTM fotogrammetrico; f) Integrazione dei due DTM

Il modello globale del Vesuvio e l'area circostante

Il modello finale del Vesuvio è stato ottenuto integrando i tre *set* di dati: l'allineamento dei singoli modelli è stato effettuato con il software *Polyworks* roto-traslando i dati *laser* e quelli ottenuti dalla digitalizzazione della cartografia nel sistema di riferimento dei punti fotografici d'appoggio utilizzati per l'orientamento delle immagini fotogrammetriche.

Nella figura 5 viene rappresentato il DTM finale a differenti scale: a) DTM ottenuto dalla digitalizzazione della cartografia; b) integrazione tra il DTM cartografico e quello fotogrammetrico; c) integrazione tra il DTM fotogrammetrico e quello *laser*; d) particolare del DTM *laser scanning* integrato con il DTM fotogrammetrico.

Conclusioni

Gli strumenti *laser scanner* terrestri presentano caratteristiche di alta precisione che ne permettono l'utilizzo in molte applicazioni topografiche, come per il rilievo di superfici fisiche di aree vulcaniche, che sono caratterizzate da bassi coefficienti di riflettività.

La porzione interna del cratere del vulcano Vesuvio è stata rilevata mediante l'utilizzo del *laser scanner* terrestre *ILRIS 3D* acquisendo 20 scansioni a partire da 4 differenti punti di stazione le cui coordinate sono state misurate con la metodologia GPS. Le scansioni sono state allineate con il software *Polyworks* che ha permesso di registrare nuvole di punti con risoluzione di pochi centimetri e con precisione sub-centimetrica per mezzo degli algoritmi ICP.

Il modello finale del Vesuvio è stato ottenuto integrando dati provenienti da differenti metodologie: la digitalizzazione della cartografia ha permesso di ottenere un DTM con risoluzione di 20 m di una zona rilevante comprendente la città di Napoli, il suo Golfo e il vulcano; la fotogrammetria digitale aerea ha fornito un DTM interno al cono con risoluzione di 50 cm e un DTM della porzione esterna (e dell'area circostante) con griglia di passo 2.5 m; il *laser scanning* ha permesso di generare un modello della porzione interna del cono con risoluzione di circa 5 cm. Anche in questo caso l'allineamento è stato effettuato con il software *Polyworks* minimizzando i residui tra punti nelle aree di sovrapposizione. I risultati hanno fornito buone co-registrazioni delle tre serie di dati; è stato quindi possibile sostituire porzioni del DTM ottenuto dal rilievo fotogrammetrico con i dati derivanti dalle scansioni *laser* terrestri. In particolare, nelle aree caratterizzate da pareti sub-verticali e nelle zone d'ombra, presenti all'interno del cono vulcanico, il DTM fotogrammetrico è risultato

insoddisfacente; al contrario, l'acquisizione di porzioni di parete tramite scansione *laser*, effettuata da diversi punti di presa, ha permesso di descrivere l'edificio vulcanico in maniera rigorosa.
Il modello 3D ad alta risoluzione interno al cono è stato utilizzato per individuare e posizionare le discontinuità strutturali, le caratteristiche morfologiche e stratigrafiche, sfruttando l'elevata risoluzione del modello e l'informazione radiometrica fornita dal *laser scanner*.

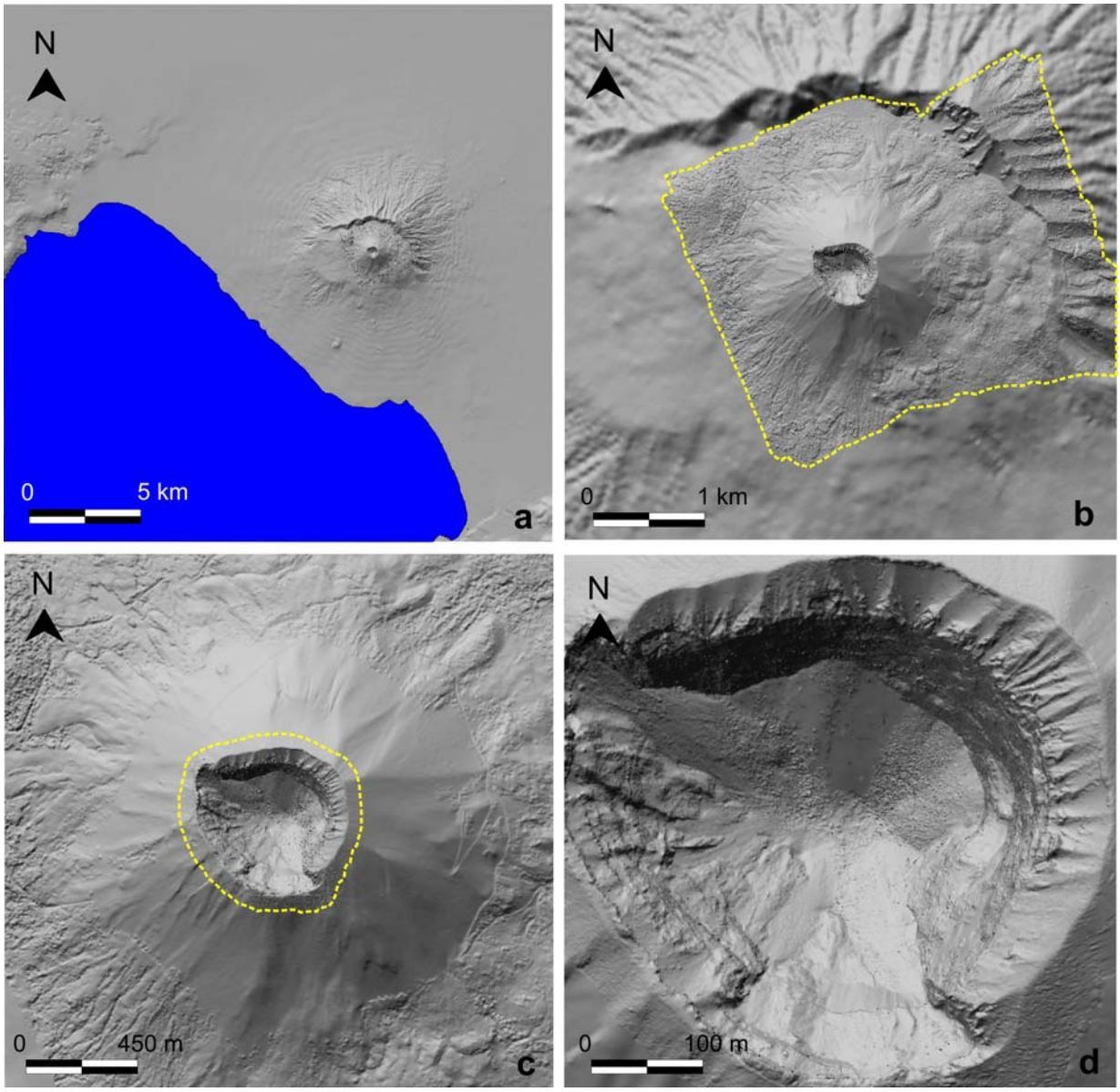

Figura 5 – a) DTM cartografico; b) DTM cartografico – fotogrammetrico; c) DTM fotogrammetrico – laser; d) DTM laser

Bibliografia

Baldi P., Fabris M., Marsella M., Monticelli R. (2005), "Monitoring the morphological evolution of the Sciara del Fuoco during the 2002-2003 Stromboli eruption using multi-temporal photogrammetry", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59: 199-211

Pesci A., Loddo F., Conforti D. (2006), "The first Terrestrial Laser Scanner application over Vesuvius (Naples, Italy): high resolution model of a volcano crater", *International Journal of Remote Sensing*, in press

Teza G., Pesci A., Fabris M., Loddo F., Zaltron N. (2005), "Verifica delle prestazioni di diversi laser scanner a lunga distanza", *Atti della 9ª Conferenza Nazionale ASITA*, 2: 1951-1956