

Misure GPS rapido statiche ed RTK per la realizzazione di un modello digitale del terreno ad alta risoluzione dell'isola di Lipari

Quaderni di Geofisica



124



Quaderni di Geofisica

Direttore Responsabile

Stefano Gresta

Editorial Board

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (INGV - RM1)

Luigi Cucci (INGV - RM1)

Nicola Pagliuca (INGV - RM1)

Umberto Sciacca (INGV - RM2)

Alessandro Settimi (INGV - RM2)

Aldo Winkler (INGV - RM2)

Salvatore Stramondo (INGV - CNT)

Milena Moretti (INGV - CNT)

Gaetano Zonno (INGV - MI)

Viviana Castelli (INGV - BO)

Antonio Guarnieri (INGV - BO)

Mario Castellano (INGV - NA)

Mauro Di Vito (INGV - NA)

Raffaele Azzaro (INGV - CT)

Rosa Anna Corsaro (INGV - CT)

Mario Mattia (INGV - CT)

Marcello Liotta (INGV - PA)

Segreteria di Redazione

Francesca Di Stefano - Referente

Rossella Celi

Barbara Angioni

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

redazionecen@ingv.it

Misure GPS rapido statiche ed RTK per la realizzazione di un modello digitale del terreno ad alta risoluzione dell'isola di Lipari

GPS rapid static and RTK surveys for the realization of a high resolution digital terrain model of Lipari Island

Marco Anzidei¹, Alessandra Esposito¹, Massimo Fabris², Vincenzo Sepe¹

¹INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Centro Nazionale Terremoti)

²Dipartimento ICEA, Università di Padova, Padova

Misure GPS rapido statiche ed RTK per la realizzazione di un modello digitale del terreno ad alta risoluzione dell'isola di Lipari

In questo studio viene illustrata una campagna di misura GPS con tecnica RTK svolta all'isola di Lipari (Isole Eolie) nell'ambito dei progetti V3 *Multi-disciplinary analysis of the relationships between tectonic structures and volcanic activity*, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile e del progetto *Response of morphoclimatic system dynamics to global changes and related geomorphologic hazard*, finanziato dal MIUR-PRIN 2011–2013. La finalità del rilievo è stata quella di ottenere le coordinate di un numero sovrabbondante di Punti di Controllo a terra, stimati con precisione centimetrica, necessari alla realizzazione di un modello digitale del terreno ad altissima risoluzione per l'isola di Lipari, a partire da dati aerofotogrammetrici. Il modello ottenuto, che ha una risoluzione compresa tra 0.5 e 5 m ed è attualmente uno dei migliori disponibili, diviene la base indispensabile per studi geomorfologici, vulcanologici, di deformazione del suolo e delle variazioni delle linee di costa di quest'area vulcanica attiva.

In this study are shown and discussed results from two topographic campaigns based on GPS/RTK technique performed in the island of Lipari (Aeolian Islands) under the projects V3 *Multi-disciplinary analysis of the relationships between tectonic structures and volcanic activity*, funded by the Department of Civil Protection, and *Response of morphoclimatic system dynamics to global changes and related geomorphologic hazard*, funded by MIUR-PRIN 2011–2013. The purpose of this survey was to obtain the coordinates of a redundant number of Control Ground Points, estimated at centimeter accuracy, necessary for the realization of a very high resolution digital terrain model for this area, from aerial photogrammetric data. The obtained model has a resolution between 0.5 and 5 m and is currently one of the best available. This is essential for detailed geomorphological, volcanological, ground deformation and coastline changes for this still active volcanic island.

Introduzione

Nell'ambito del progetto vulcanologico V3 *Multi-disciplinary analysis of the relationships between tectonic structures and volcanic activity*, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile nel periodo 2013-2015 per l'area compresa tra l'arco vulcanico delle isole Eolie e il golfo di Patti (Sicilia) e del progetto *Response of morphoclimatic system dynamics to global changes and related geomorphologic hazard*, finanziato dal MIUR-PRIN 2011–2013, sono state effettuate all'isola di Lipari misure GPS con tecniche rapido statiche e RTK di punti naturali osservabili da foto aeree. La finalità del lavoro è stata di definire un set di coordinate con precisione centimetrica per un numero sovrabbondante di Punti di Controllo a terra (*Ground Control Points, GCPs*), utili per la realizzazione di modelli digitali del terreno ad altissima risoluzione (*Digital Terrain Model, DTM*) per la rappresentazione e analisi della superficie topografica, a partire da dati provenienti da voli aerofotogrammetrici. La realizzazione di DTM accurati è di grande utilità, poiché questi rappresentano la base territoriale su cui impostare studi multidisciplinari. In particolare, in

ambiente vulcanico sono utili al riconoscimento delle morfologie legate alle strutture vulcaniche attive, come già osservato in alcune delle isole Eolie [Achilli et al., 1998; Fabris et al., 2010; Baldi et al., 2005] o in altre aree vulcaniche italiane [Baiocchi et al., 2007; Pesci et al., 2010]. Tale DTM verrà successivamente fuso con le nuove batimetrie ad altissima risoluzione in corso di realizzazione, sempre nell'ambito dello stesso progetto, come già effettuato con successo per altre aree vulcaniche italiane [Fabris et al., 2010; Baiocchi et al., 2007], utili anche per la ricostruzione delle variazioni relative del livello marino.

Nel presente studio viene descritta la campagna di misura svolta all'isola di Lipari (Isole Eolie), i punti rilevati e i dati ottenuti attraverso la realizzazione di rilievi GPS con modalità statica ed RTK, in tempo reale. Le modalità di posizionamento GPS possono essere suddivisibili in grandi linee tra statiche e cinematiche. Tra quelle statiche sono tipiche quelle utilizzate dalle reti di monitoraggio, nelle quali i sistemi ricevitori/antenne GPS rimangono fissi, generalmente per molti anni, su caposaldi di reti permanenti. Per queste reti, i dati sono trasmessi ai centri di acquisizione e analisi con il fine

ultimo, in campo geofisico, di realizzare mappe di velocità e deformazione del suolo. Le cinematiche, al contrario di quelle statiche, prevedono invece l'utilizzo del sistema ricevitore/antenna GPS tale che questo possa fornire la posizione continua di un utente in movimento, rispetto ad una stazione di riferimento fissa, con precisioni di alcuni cm. Tale misura può avvenire anche in tempo reale quando è utilizzato un sistema di trasmissione in continuo del dato per la correzione di posizione che la stazione fissa invia a quella mobile. Tra queste ultime è la tecnica GPS/RTK (*Global Positioning System / Real Time Kinematic*).

1. La tecnica GPS/RTK

La tecnica GPS/RTK è una metodologia speditiva di posizionamento GPS, che consente di misurare in modo rapido e preciso la posizione di un osservatore, posto a terra, in mare o in cielo. Si basa sui segnali trasmessi dai sistemi satellitari disponibili di navigazione globale GPS e/o GLONASS e nel prossimo futuro sarà disponibile anche dai satelliti della costellazione Galileo.

Questa tecnica si basa sulla misurazione della fase della portante del segnale, anche indicata come *Carrier Phase Enhancement* o CPGPS. In genere, si utilizza una singola stazione di riferimento per fornire correzioni in tempo reale ai ricevitori mobili impiegati nei rilievi, ottenendo in tal modo il loro posizionamento con una precisione di pochi centimetri per le coordinate plano-altimetriche dei punti misurati. Questa tecnica ha applicazioni importanti per rilievi terrestri (ad es. realizzazione di mappe) e idrografici (ad es. batimetrie).

In sintesi, il principio di base è che i ricevitori GPS debbano allineare i propri orologi e le sequenze generate dall'oscillatore interno con quelle inviate dai satelliti attraverso una sequenza binaria pseudocasuale contenuta nel segnale. Poiché il segnale satellitare, che viaggia alla velocità della luce, impiega del tempo per raggiungere il ricevitore, le due sequenze inizialmente non coincidono e sono quindi sfasate: quella generata dal satellite è in ritardo rispetto a quella generata dal ricevitore locale. Attraverso i calcoli svolti dai *software* installati all'interno dei ricevitori, le due sequenze possono essere allineate e il loro ritardo, una volta stimato e corretto attraverso orologi di precisione, rappresenta il tempo impiegato dal segnale per raggiungere il ricevitore dal satellite e attraverso il quale è possibile calcolare la distanza terra-satellite.

La precisione della misurazione di distanza terra-satellite risultante dipende infine dall'elettronica e dagli algoritmi residenti nel ricevitore. Attualmente, i ricevitori GPS dotati dell'acquisizione RTK, permettono di raggiungere una precisione di alcuni cm per la misura di punti distanti diversi km dalla stazione di riferimento utilizzata.

La tecnica RTK usa l'onda portante del segnale satellitare

permettendo un miglioramento molto elevato della stima della posizione rispetto ad un posizionamento non RTK. L'accuratezza delle misure dipende dalla capacità del ricevitore di elaborare con precisione i segnali dal satellite. In generale, questi sono in grado di allineare i segnali a circa 1% di un'ampiezza di *bit*. Ad esempio, il codice di acquisizione C/A dei satelliti GPS è inviato con un bit ogni 0,98 microsecondi, così che un ricevitore possa raggiungere una precisione di 0,01 microsecondi, equivalente a circa 3 metri di posizionamento. Il segnale P(Y), accessibile dai ricevitori solo per scopi militari e dieci volte più veloce del codice C/A, permette di ottenere circa 30 cm di precisione di posizionamento. Tuttavia, si deve considerare che esistono disturbi capaci di introdurre errori sul posizionamento, con ampiezze ben maggiori della precisione nominale. Ad es., la precisione che deriva da un segnale C/A non corretto è di circa 15 m.

In pratica, la tecnica RTK utilizza un singolo ricevitore GPS della stazione base e un numero desiderato di unità GPS mobili. La stazione base ri-trasmette la fase del vettore che osserva, mentre le unità GPS mobili confrontano le proprie misure di fase con quelle ricevute dalla stazione base. La trasmissione del segnale di correzione dalla stazione base alla stazione mobile può avvenire in diversi modi. Quello più comune che si usa in applicazioni in tempo reale si attua attraverso un collegamento radio modem, tipicamente nella banda UHF. La posizione assoluta delle posizioni stimate dipende dall'accuratezza della stima della posizione della stazione base (di cui sono note le coordinate precise essendo state calcolate in precedenza). La precisione nominale tipica per il sistema RTK è di 1 centimetro ± 2 parti per milione (ppm) in orizzontale e di due centimetri ± 2 ppm per la componente verticale. Date le precisioni, questa tecnica trova ottime applicazioni per rilievi speditivi sul territorio (ad es. realizzazione di mappe) e in mare (ad es. per batimetrie di precisione). Sono quindi di grande utilità in campo geofisico. Nella maggior parte delle applicazioni GPS/RTK viene utilizzata una singola stazione di riferimento, anche se è possibile usare contemporaneamente più stazioni. In genere, la stazione di riferimento afferisce ad una rete di stazioni GPS continue oppure viene installata temporaneamente nell'area da rilevare. In ogni caso, il funzionamento è lo stesso e si basa su due principi fondamentali:

1. la stazione di riferimento deve essere posizionata in un punto di coordinate note (eventualmente anche a posteriori);
2. le correzioni inviate al GPS mobile devono avvenire mediante un mezzo di comunicazione in tempo reale (ad es. un radio-modem o una connessione GSM) (Fig.1).

Per un corretto funzionamento della tecnica e per ottenere risultati robusti, si devono tenere presenti tre punti importanti durante i rilievi, circa il collegamento tra la stazione di

riferimento e quella rover:

1. entrambe le antenne GPS devono osservare gli stessi satelliti (almeno 6);
2. la stazione di riferimento invia tutte le sue posizioni e le osservazioni dei satelliti alla stazione mobile;
3. la stazione mobile combina le osservazioni della stazione di riferimento con le proprie per calcolare in pochi secondi la propria posizione RTK.

La posizione della stazione mobile è calcolata utilizzando algoritmi specifici RTK implementati nei firmware e software dei ricevitori, i quali permettono di lavorare con successo a distanze fino a circa 50 km dalla stazione di riferimento. In ogni caso, i software commerciali di analisi dati GPS commercializzati dalle stesse case produttrici di ricevitori, spesso implementano codici per la post-elaborazione del dato, se richiesta.

Attualmente esistono sul territorio italiano, come anche in altri Paesi, reti GPS continue equipaggiate con sistemi di trasmissione radio modem in modo da fornire, tra i propri prodotti, il servizio di correzione di posizione RTK. A tale proposito, una rete permanente di riferimento (*Continuously Operating Reference Station, CORS*), costituita da una rete di stazioni base RTK che trasmettono continuamente le correzioni di fase solitamente tramite una connessione Internet, è di grande supporto per i rilievi RTK. La precisione di un rilievo RTK ottenuta appoggiandosi ad una rete CORS viene quindi aumentata in quanto più di una stazione concorre al corretto posizionamento dei ricevitori GPS

mobili, assicurando i rilievi contro eventuali false inizializzazioni di una singola stazione base.

Ad es., in Italia si può citare la rete *ItalPoS* (<http://www.italpos.it>; <http://it.smartnet-eu.com>), che consiste in numerose stazioni distribuite in modo quasi omogeneo sul territorio, isole incluse (Fig. 2).

2. I rilievi GPS rapido statici ed RTK a Lipari

Sulla base della esperienza maturata in precedenti progetti [Achilli et al., 1998; Fabris et al., 2010; Baldi et al., 2005; Baiocchi et al., 2007; Pesci et al., 2010], è stata effettuata la misura di numerosi GCPs per disporre di un numero sovrabbondante di coordinate con il fine di raggiungere la massima precisione nelle analisi delle fotogrammetrie aeree per la realizzazione di DTM ad alta risoluzione. È stata quindi effettuata l'identificazione dei punti naturali più adatti ad essere misurati con GPS/RTK. Dapprima dai fotogrammi dei voli aerofotogrammetrici disponibili alla scala dell'intera isola e mediante le immagini di *Google Earth* [<http://www.google.com>]. In seconda fase attraverso una ricognizione sul posto per confermare la validità del sito scelto. Sono stati in tal modo identificati e selezionati punti riconoscibili, come ad es. spigoli di edifici, incroci stradali, muretti, ecc., facilmente individuabili sul terreno e sui fotogrammi.

I primi rilievi GPS in modalità rapido statica sono stati effettuati nell'ottobre 2013. Una successiva campagna di

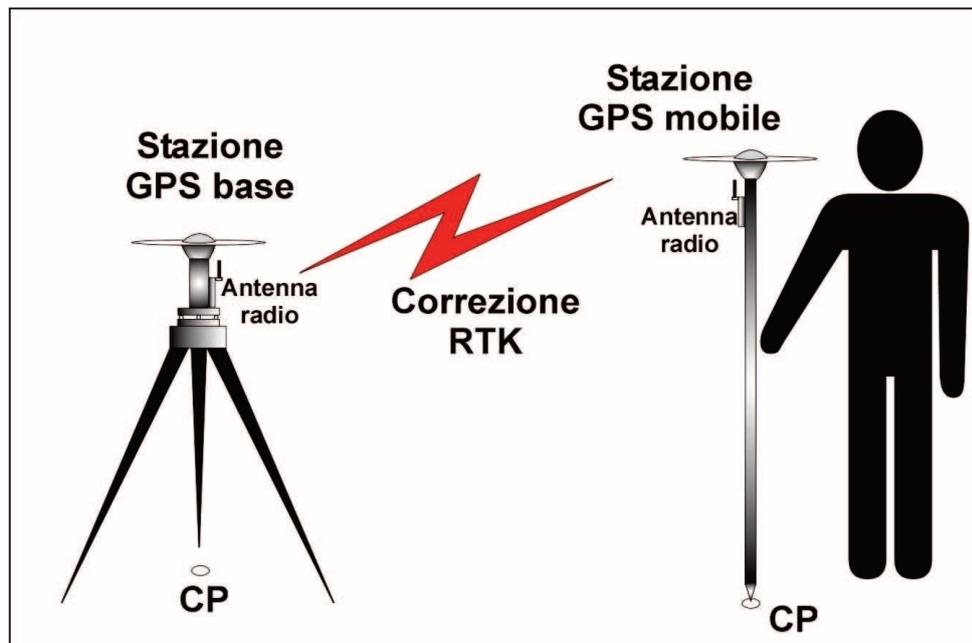


Figura 1. Schema di un rilievo con tecnica RTK e singola stazione di riferimento. Con CP è indicato il caposaldo. I due ricevitori GPS sono equipaggiati con radio modem e antenna per trasmissione in tempo reale della correzione della posizione.

Figure 1. Sketch of a GPS/RTK survey with single reference station. CP is the geodetic benchmark. The two GPS receivers are equipped with radio modem and antenna for real time transmission of the GPS base position.



Figura 2. La rete GPS SmartNet ItalPoS.
Figure 2. The SmartNet ItalPoS GPS network. (http://it.smartnet-eu.com/mappa-delle-stazioni_19.htm).

misura si è svolta tra settembre e ottobre 2014 mediante rilievi in modalità RTK. In entrambe le campagne di misura i dati sono stati acquisiti mediante ricevitori GPS geodetici tipo *Leica 1230*. Per la campagna rapido statica del 2013 è stata utilizzata un'antenna *LEIAT 504* (modello *Choke Ring*); nelle campagne RTK del 2014 è stata invece utilizzata un'antenna *Leica AX1202*. In Figura 3, in verde, sono indicati i punti 1-5 misurati con metodo rapido statico nel 2013, con tempi di occupazione compresi tra 20 e 30 minuti circa; in giallo, sono invece i punti rilevati nell'ottobre 2014, esclusivamente con metodologia RTK, per l'isola di Lipari. I

dati sono stati successivamente elaborati con il software *Leica Geomatic Office (LGO vers. 8.3)*. Le coordinate di tutti i GCPs sono state calcolate rispetto alla stazione CGPS dell'INGV di Lipari, posta all'osservatorio di Lipari (Stazione LOSV in Figura 3, con coordinate di riferimento riportate in Tabella 1), che afferisce alla rete RING [Avallone et al., 2010; Selvaggi et al., 2006].

Sono stati quindi misurati 15 punti alla scala dell'intera isola e 5 all'interno dell'abitato di Lipari. La descrizione dei singoli punti naturali misurati in occasione delle diverse campagne viene riportata in Appendice 2.

N. punto: stazione di riferimento	Nome: Osservatorio di Lipari	Sigla: LOSV
Descrizione	Stazione collocata sul tetto dell'Osservatorio geofisico INGV di Lipari	
Lat N 38° 26' 44.52692"	Lon E 14° 56' 53.35537"	Quota ellissoidica m H=273.296
X= 4832762.6271	Y= 1290248.9421	Z= 3944480.4669

Tabella 1. Coordinate della stazione GPS di riferimento INGV-ITALPOS, posta all'Osservatorio INGV di Lipari.
Table 1. Coordinates of the reference GPS station belonging to the INGV-ITALPOS network, located at the INGV Lipari Observatory.

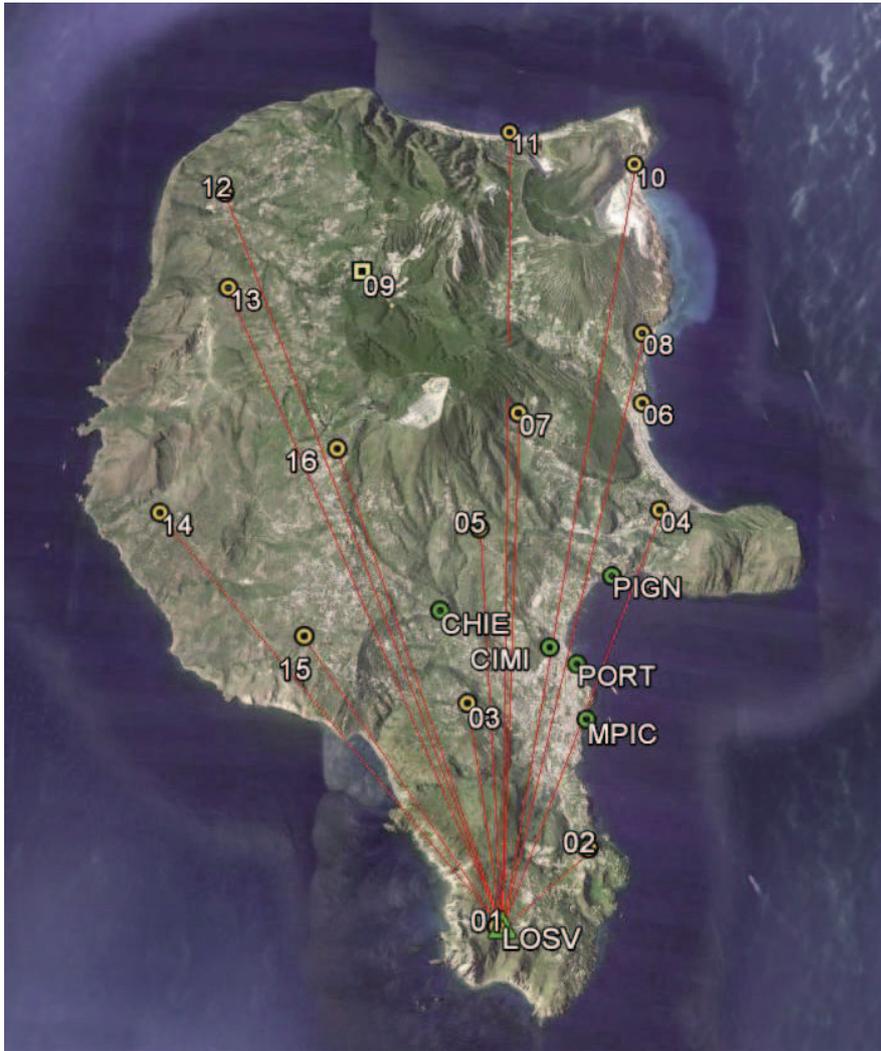


Figura 3. I GCPs misurati a Lipari. In verde sono indicati quelli misurati con tecnica GPS rapido statica per la zona intorno alla città di Lipari (campagna 2013). In giallo, quelli misurati con tecnica GPS/RTK alla scala dell'intera isola di Lipari (campagna 2014).

Figure 3. The CGPs measured at Lipari island. In green are those located in the village of Lipari, which have been surveyed by GPS rapid static measurements (2013 campaign). In yellow are those surveyed by GPS/RTK technique at the scale of Lipari island (campaign 2014).

3. Realizzazione di un DTM

La ricostruzione tridimensionale digitale della superficie del terreno può essere effettuata per mezzo di modelli digitali delle superfici che permettono di realizzare analisi morfologiche della superficie della terra.

La fotogrammetria digitale rappresenta uno degli strumenti più importanti, in termini di precisione ed efficienza, per la misura delle coordinate di grandi quantità di punti allo scopo di generare modelli tridimensionali ad alta risoluzione. I modelli digitali vengono estratti utilizzando procedure automatiche o semiautomatiche basate su ben definite tecniche di confronto della forma di un oggetto acquisito da punti diversi o dalla distribuzione dai livelli di toni di grigio o di colore in zone corrispondenti delle immagini. Modelli

digitali ad alta risoluzione e precisione acquisiti periodicamente su un'area soggetta a consistenti variazioni morfologiche vengono utilizzati per determinare le deformazioni superficiali e i movimenti di massa [Kääb et al., 1997; Baldi et al., 2005; Pesci et al., 2007; Baldi et al., 2008; Marsella et al., 2012]. Inoltre, spostamenti vettoriali di punti distribuiti nell'area di studio possono essere ottenuti dalla misura della posizione di punti naturali e/o artificiali riconosciuti sulle immagini stereoscopiche multi-temporali; questo approccio è senz'altro meno accurato di altre tecniche di rilievo come i metodi della topografia classica o il GPS, ma utilizzando un grande numero di punti può fornire una visione generale del processo; inoltre è un metodo che, a differenza di quelli menzionati, permette anche analisi retroattive del fenomeno. Gli archivi fotografici contengono un'ampia fonte di dati storici che, in alcuni casi, permettono la modellazione di aree instabili durante gli ultimi 50-60 anni. Nel caso dell'elaborazione di immagini storiche viene utilizzato il metodo conosciuto come fotogrammetria d'archivio per l'estrazione di informazioni

metriche [Chandler, Cooper, 1988a,b; Walstra et al., 2004; Chandler et al., 2007; Baldi et al., 2008].

4. Risultati: estrazione di un modello 3D dell'isola di Lipari

4.1 Dati disponibili

L'estrazione di un modello digitale tridimensionale della superficie dell'intera isola di Lipari è stata effettuata a partire da un rilievo aerofotogrammetrico effettuato il 17 maggio 2003. Si tratta di immagini in toni di grigio acquisite in scala media 1:21000 e messe a disposizione dalla Regione Sicilia per la realizzazione del DTM di Panarea [Fabris et al., 2010]. Per la copertura stereoscopica completa dell'isola sono state

necessarie 15 immagini suddivise in due strisciate. Le immagini sono state digitalizzate mediante lo scanner fotogrammetrico *Wehrli Raster Master RM2* alla massima risoluzione strumentale (2100 dpi) con una dimensione del pixel di 12 mm sul piano immagine e ottenendo una risoluzione a terra di circa 30 cm. Il DTM sarà reso disponibile al termine delle attività previste dai progetti DPC e PRIN in openmap.rm.ingv.it/openmap, dell'INGV, nei formati digitali di più comune utilizzo.

4.2 Elaborazione delle immagini

L'orientamento delle immagini è stato effettuato con il software *Socet Set (SoftCopy Exploitation Tool Set)* v. 5.4 utilizzando 18 dei 20 punti fotografici d'appoggio misurati con GPS (vedi Appendice 1.1 e 1.2), misurando 178 *tie points* e vincolando le quote delle porzioni in prossimità del mare con 51 punti individuati nei fotogrammi. I punti d'appoggio naturali, misurati con metodologia GPS e inizialmente disponibili in coordinate geografiche, sono stati trasformati nel sistema *UTM-WGS84*. Al termine dell'elaborazione delle immagini, il modello fotogrammetrico è stato estratto con residui d'orientamento di 0.051 m lungo l'asse delle Est, 0.062 m lungo l'asse delle Nord e 0.044 in quota (nel sistema *UTM-WGS84*). Dal modello fotogrammetrico è stato estratto automaticamente un modello digitale della superficie: la generazione è stata effettuata per ogni singola coppia

escludendo gli elementi di bordo (che generalmente creano problemi nella fase di *image matching*). È stato utilizzato il metodo *ATE (Automatic Terrain Extraction)* con passo griglia di 5 m [Fabris, Pesci, 2005]. I modelli parziali ottenuti sono stati quindi mosaicati mediando i risultati nelle zone di sovrapposizione. Il modello finale, costituito da 1.755.662 punti, andrà editato manualmente in alcune zone, dove la correlazione automatica non ha fornito risultati soddisfacenti. L'efficienza dell'approccio automatico del software utilizzato viene fornita da un parametro di correlazione che rappresenta, per ciascun punto estratto, la qualità del calcolo automatico della quota del punto: può indicare il successo della correlazione o che la misura è discutibile (ma non necessariamente che i punti devono essere editati manualmente); questo valore viene definito *Figures Of Merit (FOM)*. Il parametro *FOM* fornisce valori numerici compresi tra 0 e 99: valori compresi tra 0 e 32 indicano che la correlazione ottenuta nell'estrazione dei punti non è soddisfacente, mentre negli altri casi il coefficiente dovrebbe essere proporzionale al grado di affidabilità del dato misurato. I valori inferiori a 33 indicano categorie diverse di approcci utilizzati per risolvere il problema della mancata correlazione: la quota di ogni singolo punto viene quindi calcolata tramite interpolazione o estrapolazione partendo dalle quote dei punti circostanti [Baltsavias et al., 2001; Pesci et al., 2007]. Nel caso analizzato, complessivamente i punti che presentano

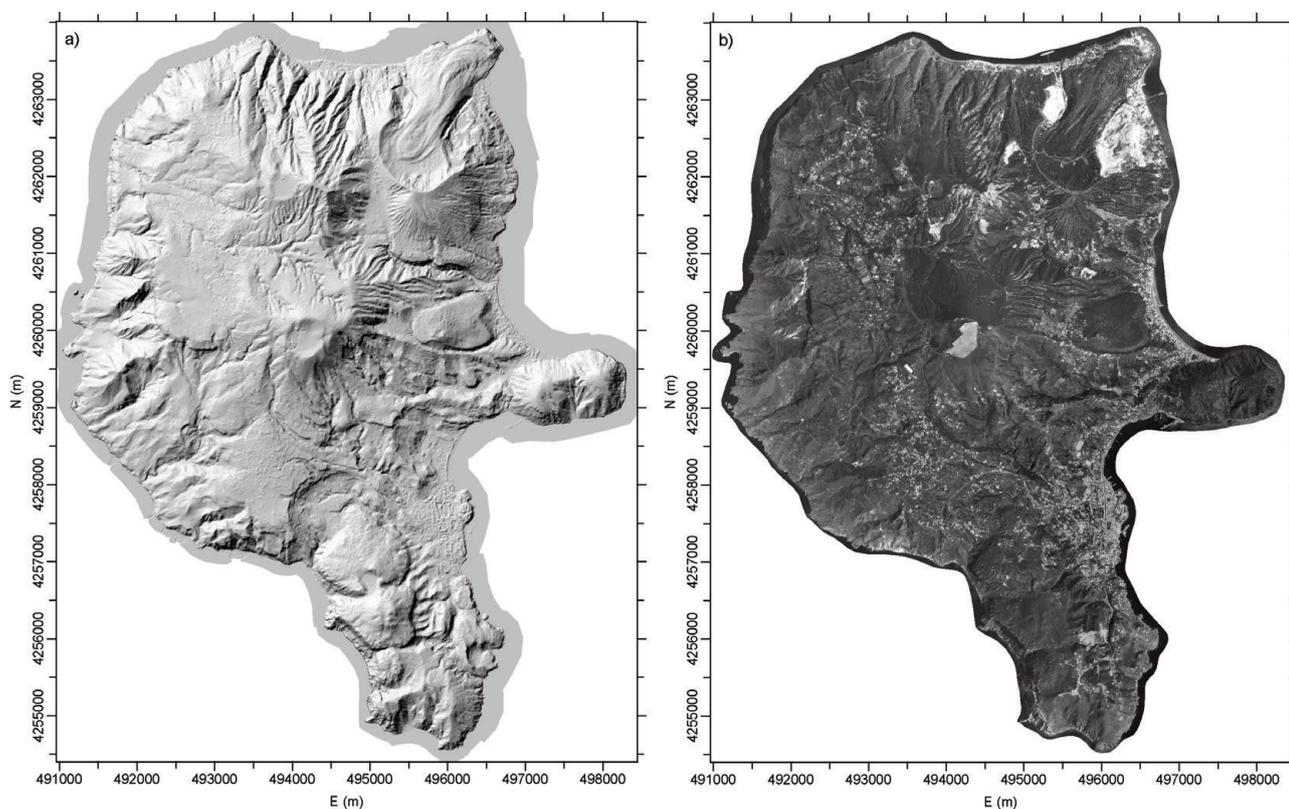


Figura 4. a) Rappresentazione del modello digitale automatico (passo griglia di 5 m); b) Ortofoto dell'Isola di Lipari (pixel medio a terra 0.5 m).

Figure 4. a) the automatically extracted digital terrain model; b) orthophoto of Lipari island (average ground pixel is 0.5 m).

FOM minore di 33 risultano pari al 42.96% e si riferiscono a 8 categorie diverse; la distribuzione degli eventi corrispondenti a FOM positivo raggiunge il valore massimo in corrispondenza al FOM pari a 88. La percentuale di FOM inferiore a 33, che normalmente si attesta su valori prossimi al 30% dei punti, in questo caso risulta superiore in quanto, per completezza di rappresentazione, sono state considerate anche le porzioni di mare in prossimità della costa che, per la natura del dato, non vengono correlate automaticamente (Fig. 4).

Le aree problematiche sono principalmente quelle delle falesie ad Ovest, Nord-Ovest dell'isola dove, per questioni metodologiche legate alla mancanza della stereoscopia nelle immagini aeree, anche in seguito alla correzione manuale la procedura non potrà comunque fornire un risultato particolarmente accurato nella modellazione 3D (problematica del tutto analoga a quella che ha portato alla definizione del modello 3D dell'isola di Panarea [Fabris et al., 2010]).

Dal modello fotogrammetrico è stata quindi estratta una prima versione dell'ortofoto in toni di grigio dell'intera isola con dimensione del pixel a terra dell'ordine di 0.5 m (Fig. 4).

5. Conclusioni

La combinazione delle tecniche GPS nelle modalità statiche ed RTK ha permesso di misurare con tempi estremamente ridotti e con precisione media di 0.011 m i 20 punti di appoggio (GCPs) all'isola di Lipari ai fini della realizzazione di un Modello Digitale del Terreno ad alta risoluzione. Quest'ultimo, grazie all'utilizzo dei CGP, è stato realizzato con una risoluzione compresa tra 5 e 0.5 m e costituisce uno dei migliori DTM dell'isola di Lipari attualmente disponibili.

Ringraziamenti

I rilievi GPS e la realizzazione del DTM sono stati effettuati nell'ambito dei progetti DPC-INGV V3, *Multi-disciplinary analysis of the relationships between tectonic structures and volcanic activity* e del progetto MIUR-PRIN 2011–2013 *Response of morphoclimatic system dynamics to global changes and related geomorphologic hazard*. I dati relativi ai voli fotogrammetrici sono stati messi a disposizione dalla Regione Sicilia. Lo studio si inquadra all'interno delle linee attività della Struttura Vulcani e della Struttura Ambiente dell'INGV. In particolare nella Linea di Attività 6, *Ambiente, Sicurezza e Territorio* per studi riguardanti la subsidenza delle coste.

Bibliografia

Achilli V., Baldi P., Baratin L., Bonini C., Ercolani E., Gandolfi S., Anzidei M., Riguzzi F., (1998). *Digital*

photogrammetric survey on the island of Vulcano. Acta Vulcanologica 10, 1-6.

Avallone A., Selvaggi G., D'Anastasio E., D'Agostino N., Pietrantonio G., Riguzzi F., Serpelloni E., Anzidei M., Casula G., Cecere G., D'Ambrosio C., De Martino P., Devoti R., Falco L., Mattia M., Rossi M., Obrizzo F., Tammaro U., Zarrilli L., (2010). *The RING network: improvement of a GPS velocity field in the central Mediterranean*. Annals of Geophysics, 53, 2, 39-54.

Baiocchi V., Anzidei M., Esposito A., Fabiani U., Pietrantonio G., Riguzzi F., (2007). *Intégr bathymétrie et lidar*. Geomatique, 55, 2007.

Baldi P., Fabris M., Marsella A., 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 and Remote Sensing, 59 (4): 199-211.

Baldi P., Cenni N., Fabris M., Zanutta A., (2008). *Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data*. Geomorphology, 102: 435-444.

Baldi P., Coltelli M., Fabris M., Marsella M., Tommasi P., (2008). *High precision photogrammetry for monitoring the evolution of Sciara del Fuoco after the 2002-2003 Stromboli eruption*. Bulletin of Volcanology, 70: 703-715. DOI: 10.1007/s00445-007-0162-1

Baltsavias E. P., Favey E., Bauder A., Bösch H., Pateraki M., (2001). *Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring*. Photogrammetric Record, 17, 98: 243-273.

Chandler J.H., Cooper M., (1988a). *Monitoring the development of landslides using archival photography and analytical photogrammetry*. Land Miner Surveying Royal Institution of Chartered Surveyors, 6: 576-584.

Chandler J.H., Cooper M., (1988b). *The extraction of positional data from historical photographs and their application in geomorphology*. Photogrammetric Record, 13 (73): 69-78.

Chandler J.H., Lane S., Walstra J., (2007). *Quantifying landform change*. In: Fryer J, Mitchell H, Chandler JH (Eds.), Applications of 3D Measurement from Images, Whittles Publishing, Dunbeath, UK: 139-170.

Fabris M., Pesci A., (2005). *Automated DEM extraction in digital aerial photogrammetry: precisions and validation for mass movement monitoring*. Annals of Geophysics, 48 (6): 57-72. DOI: 10.4401/ag-3247

Fabris M., Baldi P., Anzidei M., Pesci A., Bortoluzzi G., Aliani S., (2010). *High resolution topographic model of Panarea island by fusion of photogrammetric, lidar and bathymetric Digital Terrain Models*. The Photogrammetric Record, 25 (132): 382-401. DOI: 10.1111/j.1477-9730.2010.00600.x

Kääb A., Haeberli W., Gudmundsson G.H., (1997). *Analysing*

- the creep of mountain permafrost using high precision aerial photogrammetry: 25 years of monitoring Gruben Rock glacier, Swiss Alps.* Permafrost and Periglacial Process, 8: 409-426.
- Marsella M., Baldi P., Coltelli M., Fabris M., (2012). *The morphological evolution of the Sciara del Fuoco since 1868: reconstructing the effusive activity at Stromboli volcano.* Bulletin of Volcanology, 74, 231-248. DOI: 10.1007/s00445-011-0516-6
- Pesci A., Fabris M., Conforti D., Loddo F., Baldi P., Anzidei M., (2007). *Integration of ground-based laser scanner and aerial digital photogrammetry for topographic modelling of Vesuvio volcano.* Journal of Volcanology and Geothermal Research, 162 (3): 123-138. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2007.02.005
- Selvaggi G., Mattia M., Avallone A., D'Agostino N., Abruzzese L., Anzidei M., Cantarero M., Cardinale V., Castagnozzi A., Casula G., Cerere G., Cogliano R., Criscuoli F., D'Ambrosio C., D'Anastasio E., De Martino P., Del Mese S., De Luca G., Devoti R., (2006). *La Rete Integrata Nazionale GPS (RING) dell'INGV: una infrastruttura aperta per la ricerca scientifica.* Atti Conferenza Nazionale Asita, Federazione delle Associazioni Scientifiche per le Informazioni Territoriali e Ambientali. Fiera di Bolzano, 17 novembre 2006.
- Walstra J., Chandler J.H., Dixon N., Dijkstra T.A., (2004). *Extracting landslide movements from historical aerial photographs.* In: Lacerda W, Erlich M, Fontoura SAB, Sayao ASF (Eds.), *Landslides: Evaluation and Stabilization*, Taylor & Francis, London: 843-850.

appendice 1

**Coordinate dei punti di appoggio
(GCP)**

Coordinate Geodetiche
Geodetic Coordinates

Nome	Lat N	σ N (m)	Lon E	σ E (m)	Quota (m)	σ Quota (m)
LOSV	38°26'44.52692"	0.000	14°56'53.35537"	0.000	273.296	0.000
CIMI	38°28'14.20601"	0.001	14°57'09.95434"	0.003	57.938	0.003
MPIC	38°27' 2.99833"	0.001	14°57'26.54188"	0.001	46.330	0.001
PIGN	38°28'39.66023"	0.001	14°57'33.06174"	0.001	49.010	0.001
PORT	38°28'10.36973"	0.054	14°57'21.70104"	0.059	45.031	0.080
CHIE	38°28' 9.27824"	0.001	14°56'22.83429"	0.001	182.175	0.001
0001	38°26'44.15251"	0.009	14°56'51.94542"	0.006	264.909	0.013
0002	38°27'11.87076"	0.015	14°57'27.39781"	0.009	153.673	0.041
0003	38°27'51.08399"	0.008	14°56'35.85364"	0.007	189.529	0.027
0004	38°29'03.35561"	0.005	14°57'51.11660"	0.005	57.890	0.013
0005	38°28'45.12249"	0.008	14°56'34.21463"	0.006	282.539	0.013
0006	38°29'39.50096"	0.005	14°57'42.87130"	0.004	45.031	0.014
0007	38°29'20.78450"	0.008	14°56'43.66419"	0.007	332.821	0.019
0008	38°30'01.69352"	0.013	14°57'39.66998"	0.014	103.149	0.029
0010	38°31'03.06996"	0.007	14°57'34.36011"	0.007	46.559	0.016
0011	38°31'10.07268"	0.008	14°56'41.11095"	0.009	46.393	0.015
0012	38°30'26.52017"	0.009	14°54'40.94001"	0.009	325.941	0.020
0013	38°29'49.42604"	0.011	14°54'45.07170"	0.007	406.830	0.015
0014	38°28'39.84297"	0.007	14°54'29.05893"	0.005	162.684	0.016
0015	38°28'03.87239"	0.008	14°55'28.92168"	0.008	281.209	0.014
0016	38°29'00.20709"	0.006	14°55'32.92211"	0.004	438.293	0.011

Coordinate Cartesiane Cartesian Coordinates

Nome	Lat N	σ N (m)	Lon E	σ E (m)	Quota (m)	σ Quota (m)
LOSV	4832762.6271	0.000	1290248.9421	0.000	3944480.467	0.000
CIMI	4830834.2276	0.002	1290150.5661	0.003	3946511.934	0.002
MPIC	4831114.6923	0.001	1290641.7086	0.001	3945992.703	0.001
PIGN	4830211.1350	0.001	1290563.8981	0.001	3947120.856	0.001
PORT	4830822.0779	0.070	1290442.0700	0.060	3946411.290	0.065
CHIE	4831128.7929	0.001	1289046.9540	0.001	3946711.677	0.001
0001	4832772.0353	0.013	1290216.0643	0.007	3944466.209	0.009
0002	4831952.5679	0.039	1290887.0304	0.015	3945066.414	0.018
0003	4831575.5212	0.022	1289492.8349	0.010	3946035.558	0.016
0004	4829665.6332	0.006	1290871.0902	0.006	3947698.346	0.010
0005	4830654.5103	0.013	1289205.9083	0.005	3947398.019	0.008
0006	4829037.3639	0.009	1290496.3410	0.005	3948562.727	0.011
0007	4829972.2874	0.014	1289260.8739	0.008	3948290.123	0.015
0008	4828689.8041	0.024	1290323.1651	0.015	3949134.474	0.019
0010	4827541.7920	0.013	1289883.2447	0.007	3950580.193	0.011
0011	4827744.5746	0.0156	1288602.2145	0.008	3950749.036	0.009
0012	4829513.9825	0.016	1286060.8067	0.009	3949872.275	0.014
0013	4830237.5132	0.010	1286357.0932	0.007	3949027.463	0.016
0014	4831443.0930	0.011	1286276.4870	0.006	3947195.997	0.013
0015	4831826.0381	0.013	1287880.2542	0.008	3946401.350	0.009
0016	4830875.5192	0.010	1287727.2518	0.004	3947859.069	0.008

appendice 2

**Descrizione dei punti d'appoggio
(GCP)**

Di seguito vengono presentati e descritti i punti naturali misurati con GPS per l'Isola di Lipari.

Nella prima parte sono descritti i 5 punti naturali misurati con tecniche rapido statiche nell'abitato di Lipari. Nella seconda parte i 15 punti naturali misurati con tecniche GPS/RTK alla scala dell'intera isola.

Parte prima: città di Lipari. GCP misurati con tecniche GPS rapido statiche
Part first: the GCPs measured by GPS rapid static technique

N. punto: 1	Nome: CIMITERO	Sigla: CIMI
Descrizione	Nel cimitero di Lipari. In corrispondenza di un terrazzo mattonato con piastrelle bianche e grigie. Sullo spigolo della scala	
Lat N	Lon E	Quota ellissoidica m
38° 28' 14.20601" N	14° 57' 09.95434" E	57.938
Err. Lat 0.001	Err. Lon 0.003	Err. H 0.003

N. punto: 2	Nome: MARINA CORTA	Sigla: MPIC
Descrizione	A Marina Corta. In corrispondenza della recinzione in muratura della Chiesetta delle Anime del Purgatorio. Al lato della scala di ingresso	
Lat N (err)	Lon E (err)	Quota ellissoidica m (err)
38° 27' 52.99833" N	14° 57' 26.54188" E	46.330
Err. Lat 0.001	Err. Lon 0.001	Err. H 0.001

N. punto: 3	Nome: PIGNATARO	Sigla: PIGN
Descrizione	Lungo la strada da Lipari verso Pignataro. In corrispondenza del centro di una piccola piattaforma in cemento, su una piazzola a picco sul mare	
Lat N (err)	Lon E (err)	Quota ellissoidica m (err)
38° 28' 39.66023" N	14° 57' 33.06174" E	49.010
Err. Lat 0.001	Err. Lon 0.001	Err. H 0.001
		

N. punto: 4	Nome: PORTO DI LIPARI	Sigla: PORT
Descrizione	In corrispondenza dell'angolo sud della banchina del porto, presso la scaletta di accesso al mare	
Lat N (err)	Lon E (err)	Quota ellissoidica m (err)
38° 28' 10.36973" N	14° 57' 21.70104" E	45.031
Err. Lat 0.054	Err. Lon 0.059	Err. H 0.080
		

N. punto: 5	Nome: CHIESA	Sigla: CHIE
Descrizione	In corrispondenza della superficie del muretto, ai piedi della scala di accesso alla chiesa	
Lat N (err)	Lon E (err)	Quota ellissoidica m (err)
38° 28' 19.27824" N	14° 56' 22.83429" E	182.175
Err. Lat 0.001	Err. Lon 0.001	Err. H 0.001
		

Parte seconda: isola di Lipari. GCP misurati con tecniche GPS/RTK
Part second: Lipari Island. GCPs measured by GPS/RTK technique

N. punto: 0001	Nome:	Sigla:
Descrizione	Spigolo anteriore Dx, sulla piazzola a picco sul mare nel parcheggio antistante l'Osservatorio INGV di Lipari	
Lat N	Lon E	Quota ellissoidica m
38° 26' 44.15251" N	14° 56' 51.94542" E	264.909
Err. Lat 0.009	Err. Lon 0.006	Err. H 0.013
NOTE: altezza antenna = 0.050 m dalla superficie del muretto		

N. punto: 0002	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari - Via per l'Osservatorio. Spigolo più basso al confine tra le due proprietà.	
Lat N	Lon E	Quota ellissoidica m
38° 27' 11.87076" N	14° 57' 27.39781" E	153.673
Err. Lat 0.015	Err. Lon 0.009	Err. H 0.041
NOTE: altezza antenna = 3.450 m dal piano stradale		

N. punto: 0003	Nome:	Sigla:
Descrizione	Sul ciglio stradale in corrispondenza di un pilastrino in c.a.	
Lat N	Lon E	Quota ellissoidica m
38° 27' 51.08399" N	14° 56' 35.85364" E	189.529
Err. Lat 0.008	Err. Lon 0.007	Err. H 0.027

NOTE: altezza antenna = 0.050 m



N. punto: 0004	Nome:	Sigla:
Descrizione	Sul parapetto in c.a. del ponticello, Lipari-Canneto.	
Lat N	Lon E	Quota ellissoidica m
38° 29' 03.35561" N	14° 57' 51.11660" E	57.890
Err. Lat 0.005	Err. Lon 0.005	Err. H 0.013

NOTE: altezza antenna = 0.050 m



N. punto: 0005	Nome:	Sigla:
Descrizione	In corrispondenza dell'angolo del muro delle scale della chiesa di S. Margherita, Lipari.	
Lat N	Lon E	Quota ellissoidica m
38° 28' 45.12249" N	14° 56' 34.21463" E	282.539
Err. Lat 0.008	Err. Lon 0.006	Err. H 0.013
NOTE: altezza antenna = 1.180 m		

N. punto: 0006	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari – Spiaggia di Canneto. Sul muro fronte spiaggia. Centrato.	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 29' 39.50096" N	14° 57' 42.87130" E	45.031
Err. Lat 0.005	Err. Lon 0.004	Err. H 0.014
NOTE: altezza antenna = 0.050 m		

N. punto: 0007	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari. Alla base del muro,	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 29' 20.78450" N	14° 56' 43.66419" E	332.821
Err. Lat 0.008	Err. Lon 0.007	Err. H 0.019
NOTE: altezza antenna = 2.600 m		
		

N. punto: 0008	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari, S.S. tra Canneto e Porticello. Sul muretto.	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 30' 01.69352" N	14° 57' 39.66998" E	103.149
Err. Lat 0.013	Err. Lon 0.014	Err. H 0.029
NOTE: altezza antenna = 0.050 m		
		

N. punto: 0010	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari - Porticello. Sul muretto a sinistra alla fine della strada che dalla statale porta alla spiaggia.	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 31' 03.06996" N	14° 57' 34.36011" E	46.559
Err. Lat 0.007	Err. Lon 0.007	Err. H 0.016

NOTE: altezza antenna = 0.050 m



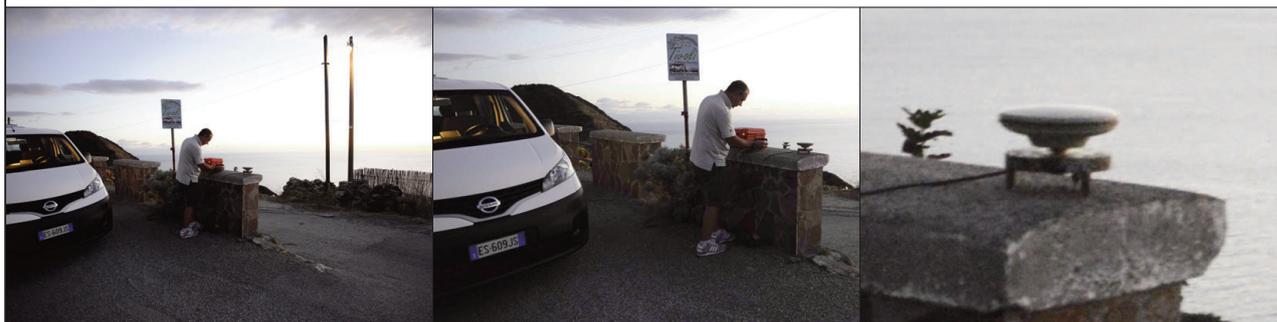
N. punto: 0011	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari - Acquacalda. In corrispondenza dello spigolo dx del molo in disuso.	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 31' 10.07268" N	14° 56' 41.11095" E	46.393
Err. Lat 0.008	Err. Lon 0.009	Err. H 0.015

NOTE: altezza antenna = 2.000 m



N. punto: 0012	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari – Acquacalda verso Quattropani. In corrispondenza del muretto stradale al bivio con la strada che porta all’Agriturismo Tivoli.	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 30’ 26.52017” N	14° 54’ 40.94001” E	325.950
Err. Lat 0.009	Err. Lon 0.009	Err. H 0.020

NOTE: altezza antenna = 2.000 m



N. punto: 0013	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari – Quattropani. Strada che porta alle cave di caolino. In corrispondenza del bordo stradale al bivio con una salita	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 29’ 49.42604” N	14° 54’ 45.07170” E	406.830
Err. Lat 0.011	Err. Lon 0.007	Err. H 0.015

NOTE: altezza antenna = 2.000 m



N. punto: 0014	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari – Quattropani, Terme di S. Calogero. Sul muretto del ponticello del tornante, scendendo dopo le terme.	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 28' 39.84297" N	14° 54' 29.05893" E	162.684
Err. Lat 0.007	Err. Lon 0.005	Err. H 0.016

NOTE: altezza antenna = 0.050 m



N. punto: 0015	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari, Pianoconte. Sulla sommità del grande vaso posto sullo spigolo del tetto.	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 28' 03.87239" N	14° 55' 28.92168" E	281.209
Err. Lat 0.008	Err. Lon 0.007	Err. H 0.014

NOTE: altezza antenna = 0.000 m



N. punto: 0016	Nome:	Sigla:
Descrizione	Lipari, Monte Sant'Angelo. Superficie del muro fronte strada.	
Lat N	Lon E (err)	Quota ellissoidica m
38° 29' 00.20709" N	14° 55' 32.92211" E	438.293
Err. Lat 0.006	Err. Lon 0.004	Err. H 0.011

NOTE: altezza antenna = 0.050 m



Indice

Introduzione	4
1. La tecnica GPS/RTK	5
2. I rilievi GPS rapido statici ed RTK a Lipari	6
3. Realizzazione di un DTM	8
4. Risultati: estrazione di un modello 3D dell'isola di Lipari	8
4.1 Dati disponibili	8
4.2 Elaborazione delle immagini	9
5. Conclusioni	10
Ringraziamenti	10
Bibliografia	10
Appendice 1: Coordinate dei punti di appoggio (GCP)	13
Coordinate Geodetiche – Geodetic coordinates	15
Coordinate Cartesiane – Cartesian coordinates	16
Appendice 2: Descrizione dei punti d'appoggio (GCP)	17
Parte prima: città di Lipari. GCP misurati con tecniche GPS rapido statiche	19
Parte seconda: isola di Lipari. GCP misurati con tecniche GPS/RTK	21

Quaderni di Geofisica

ISSN 1590-2595

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/quaderni-di-geofisica/>

I Quaderni di Geofisica coprono tutti i campi disciplinari sviluppati all'interno dell'INGV, dando particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari, che per tipologia e dettaglio necessitano di una rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. La pubblicazione on-line fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Rapporti tecnici INGV

ISSN 2039-7941

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/rapporti-tecnici-ingv/>

I Rapporti Tecnici INGV pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico e di rilevante interesse tecnico-scientifico per gli ambiti disciplinari propri dell'INGV. La collana Rapporti Tecnici INGV pubblica esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. L'Editorial Board multidisciplinare garantisce i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

Miscellanea INGV

ISSN 2039-6651

<http://istituto.ingv.it/l-ingv/produzione-scientifica/miscellanea-ingv/>

La collana Miscellanea INGV nasce con l'intento di favorire la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV (sismologia, vulcanologia, geologia, geomagnetismo, geochimica, aeronomia e innovazione tecnologica). In particolare, la collana Miscellanea INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli ecc..

Coordinamento editoriale e impaginazione

Centro Editoriale Nazionale | INGV

Progetto grafico e redazionale

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2015 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

<http://www.ingv.it>



Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia