

Modelli digitali del terreno tratti da immagini satellitari: analisi e validazione dei DEM ASTER per applicazioni geomorfologiche

Digital terrain models from satellite images: analysis and validation of ASTER DEMs for geomorphological applications

CAPOLONGO D. (*), MARANGI M. (**),
ALBANESE F. (*), PENNETTA L. (*)

RIASSUNTO - Il satellite TERRA sul quale è montato, il sensore ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) sta acquisendo dal 1999 immagini stereo digitali *along-track* a 15 m sull'intero globo. La possibilità di estrarre modelli digitali del terreno (DEM) per l'intera superficie del pianeta è, tra gli obiettivi della missione, una delle applicazioni più interessanti.

L'utilizzo proficuo degli ASTER DEM per scopi geomorfologici è tuttavia subordinato alla determinazione della loro accuratezza. Nel presente lavoro vengono presentate una serie di analisi e tecniche validate, volte alla valutazione del grado di accuratezza di ASTER DEM con *pixel* a 30 m per applicazioni geomorfologiche. L'area *test* corrisponde ad una porzione del territorio lucano-calabro, nell'Italia meridionale. Obiettivo specifico è stato quello di individuare le diverse fonti di errore (tipo di *dataset*, procedura di estrazione, caratteristiche altimetriche e topografiche dell'area *test*) e la loro influenza sull'accuratezza del DEM e di alcuni parametri geomorfologici derivati. Il lavoro è stato rivolto alla determinazione dell'entità dell'errore presente e della sua struttura spaziale, attraverso il confronto con un DEM dell'IGM (Istituto Geografico Militare) di pari risoluzione. La caratterizzazione spaziale dei *residual* è stata studiata sulla base dell'individuazione di tre sub-aree (*regioni*), distinte per fasce altimetriche e corrispondenti a tre distretti geomorfologici distinti all'interno dell'ASTER DEM. Analogo studio è stato svolto su alcuni

parametri geomorfologici derivati come quali le pendenze, l'esposizione dei versanti, e il reticolo idrografico derivato. I risultati ottenuti mostrano un RMSE inferiore alla risoluzione del *pixel*, compreso tra i 19 e i 26 m. L'errore è apparso caratterizzato da ampia variabilità spaziale ed influenzato dall'altimetria e dalla topografia. I prodotti derivati ne risultano, invece, scarsamente influenzati. Tutte le analisi svolte nella sub-area montana (quote superiori agli 800 m) hanno mostrata i risultati più accurati.

PAROLE CHIAVE: geomorfologia quantitativa; geomorfologia applicata; modelli digitali del terreno; telerilevamento; immagini Aster.

ABSTRACT - Since it was launched on board the NASA TERRA satellite on december 1999, ASTER sensor (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) has been acquiring *along-track* digital stereo dataset at 15 m on global level. One of the most interesting applications of these dataset, among the mission targets, is the chance to extract DEMs for all regions of the world. However, the proficient use of these ASTER DEMs depends on their accuracy assessment. In this paper, a series of analysis and validating techniques, both mathematic-quantitative and qualitative, are shown in order to evaluate the accuracy degree of a 30 m ASTER DEM relative to a portion of lucanian-calabrian region

(*) Dipartimento di Geologia e Geofisica, Università degli Studi di Bari, via Orabona 4, 70125 Bari
(**) Planetek Italia s.r.l., via Massaua 12, 70123 Bari

in the south of Italy. The specific aim of this work is to characterize different error sources (dataset structure, extraction procedure, topographic and altimetric features of the testing area) and their influence on the accuracy degree. This work, thence, tends to identify the error magnitude and its spatial structure through the computing of the differences of heights (residual), for each pixel, with an IGM (Military Geographic Institute) DEM of the same area. The spatial characterization of the residual has been studied identifying 3 sub-region inside the ASTER DEM with different height ranges. Other surfaces derived from ASTER DEM, like slope, aspect, flow accumulation and stream network, have been analysed as well. The results of the analysis show an RMSE value lower than the pixel resolution, between 19 and 26 m. The error range is strongly influenced by height and topography and it is characterized by great spatial variability, whereas these two elements barely influence the derived products. In every analysis performed, the mountain region (higher than 800 m) has shown the greatest accuracy degree.

KEYWORDS - quantitative geomorphology; applied geomorphology; digital elevation model; remote sensing; Aster images.

1. - INTRODUZIONE E OBIETTIVI

I DEM sono attualmente uno strumento fondamentale ed irrinunciabile nello studio dei processi "spazialmente distribuiti" che interessano il paesaggio fisico, la sua morfologia e la sua evoluzione. La loro potenzialità risiede nella possibilità di effettuare analisi sia qualitative che quantitative della topografia, della morfologia del territorio, nonché il *modelling* di processi geomorfologici e idrologici, che ivi si svolgono.

Il "Terrain modeling", mediante l'utilizzo di DEM, è divenuto negli ultimi anni parte integrante di discipline quali idrologia, geologia, tettonica, oceanografia, climatologia e geomorfologia. Questa moderna disciplina è una amalgama di scienze della terra, informatica, matematica ed ingegneria e rientra a pieno titolo nel campo della geomorfologia quantitativa o geomorfometria. L'analisi digitale di griglie a maglie quadrate di elevazione, i DEM, hanno rivoluzionato le metodologie di visualizzazione e di analisi del paesaggio fisico. I sistemi informativi geografici (GIS), inoltre, hanno permesso l'integrazione della analisi geomorfologica quantitativa con *set* di dati non prettamente topografici. (PIKE, 1995).

Recentemente un forte impulso a questo settore è dato dalla possibilità di realizzazione di modelli digitali del terreno da dati telerilevati (LIDAR, SRTM) o immagini satellitari (ASTER, IKONOS, ALOS, etc). Queste tec-

nologie oltre a garantire la costruzione di DEM per intere catene montuose o anche per l'intero globo, permettono un monitoraggio nel tempo delle variazioni della topografia e dei processi che la determinano grazie alla periodicità con la quale le immagini vengono acquisite.

Il satellite TERRA sul quale è montato, il sensore ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) sta acquisendo dal 1999 dati stereo digitali *along-track* a 15 m sull'intero globo. La possibilità di estrarre modelli digitali del terreno per l'intera superficie del pianeta è, tra gli obiettivi della missione, una delle applicazioni più interessanti. Recentemente le applicazioni di maggiore interesse di questi dati hanno riguardato, oltre alla ricerca idrologica ed alla gestione delle risorse idriche, l'analisi ed il monitoraggio dei ghiacciai (KAMP *et alii*, 2003), dei vulcani (STEVENS *et alii*, 2004) e del *modelling* dei fenomeni ad essi connessi. L'importanza di questo tipo di *dataset*, nell'ottica della valutazione e previsione dei rischi ambientali e negli interessi di protezione civile, su scala sia italiana che internazionale appare evidente.

La promozione nell'ambito della ricerca scientifica ed in particolare di quella geomorfologica, e altresì in campo applicativo, di tali prodotti satellitari ha posto fortemente all'attenzione dei ricercatori e di tutti gli utenti il problema della determinazione del grado di accuratezza col quale i DEM riproducono la superficie topografica. Se la risoluzione spaziale di un DEM, la fonte di dati ed il metodo utilizzati per la sua estrazione sono informazioni in generale note, disponibili e fornite insieme ad esso (metadati), l'informazione sugli errori, inevitabilmente presenti, è scarsa ed inadeguata.

Il presente lavoro si pone due obiettivi principali: a) individuare parametri e metodi per definire l'accuratezza o più in generale la "bontà" di un DEM per scopi geomorfologici; b) validare i DEM tratti da immagini ASTER per applicazioni geomorfologiche.

2. - STIMA DELLA QUALITÀ DEI DEM

Valutare la qualità di un DEM è tutt'altro che una operazione banale. Spesso viene confusa la risoluzione di un DEM (dimensioni del *pixel*) con qualità (attinenza del modello alla realtà). In altre parole si tende a ritenere che DEM a maggiore risoluzione siano di più alta qualità, cosa non sempre vera.

La qualità di un DEM viene normalmente definita attraverso il solo calcolo dell'RMSE (*Root Mean Square Error*) delle quote, un parametro statistico che non rivela le differenti fonti di errore presenti e né predice il loro effetto sui prodotti derivati dal DEM. L'inadeguatezza di questo parametro utilizzato da solo, è dovuta al fatto che il suo valore si basa sull'esiguo numero di punti selezionati per il suo calcolo, rispetto alle migliaia o milioni di punti costituenti la griglia del DEM.

L'errore viene misurato ed utilizzato per fornire una stima del *range* possibile di errore riscontrabile su altri punti, dove non è stato misurato direttamente. L'RMSE, dunque, è una stima globale che non informa sulla reale accuratezza del dato in specifiche posizioni all'interno del DEM. Oltretutto sembra che le superfici derivate prime dai DEM, come le pendenze (*slope*) e l'esposizione dei versanti (*aspect*), e ancor di più le derivate seconde, come le curvature dei medesimi (*curvature*), risultino essere maggiormente sensibili alla magnitudo dell'errore, e soprattutto alla sua distribuzione spaziale (DESMET, 1997; HOLMES *et alii*, 2000; WISE, 2000). Nel calcolo di queste superfici l'errore sembra propagarsi maggiormente e crescere di valore, ma anche in questo caso è ignota la sua precisa entità. Appare chiaro, quindi, che per applicazioni geomorfologiche DEM con valori bassi di RMSE potrebbero mostrare inaccuratezza su parametri geomorfologici fondamentali quali pendenze o curvatura dei versanti.

WISE (2000), investiga altre metodologie, oltre all'RMSE, per la definizione della qualità di differenti DEM. Poiché non esistono DEM accurati in senso assoluto, affidabili per qualsiasi loro impiego, la giusta soluzione sarebbe quella di definire la qualità di un DEM in funzione del particolare utilizzo al quale è destinato. L'autore sottolinea che l'RMSE non permette la distinzione della tipologia di errore e, quindi, la sua corretta rimozione e suggerisce che un approccio più vantaggioso consista nell'analisi del *pattern* dei valori di RMSE.

DESMET (1997), sottolinea che la qualità di un dato dovrebbe essere valutata in termini di precisione (*precision*) ed affidabilità delle forme (*shape reliability*), poiché anche algoritmi di interpolazione accurati non necessariamente preservano distinti *pattern* spaziali fondamentali per studi geomorfologici. La prima può essere definita come l'accuratezza con la quale vengono valutate le quote per i punti non campionati nel rilievo, e la seconda come il grado

di fiducia col quale la morfologia, o il *pattern* spaziale della topografia, viene rispettata nella superficie interpolata.

Per quanto riguarda gli ASTER DEM, l'ASTER *Digital Elevation Model Working Group* (ADEMWG) fornisce una descrizione generale dei parametri che caratterizzano l'accuratezza, la precisione e la risoluzione degli ASTER DEM. Per definire la loro accuratezza, l'ADEMWG ha utilizzato misure di RMSE (*Root Mean Square Error*), secondo le quali dovrebbe essere ipotizzato un RMSE_{xyz} approssimativamente equivalente alla risoluzione del *pixel*. La valutazione dell'errore è stata eseguita sottraendo, *pixel per pixel*, i valori delle quote di un DEM ASTER da quelli di un DEM USGS 7-1/2 *minute* di Huntsville, Alabama, di accuratezza nota. L'RMSE_z risultante si è attestato sul valore di ± 13 m.

Sempre per la stessa area di studio HIRANO *et alii* (2003), valutano l'accuratezza di un ASTER DEM, sottraendone i valori, con una operazione algebrica tra *raster*, da quelli dell'USGS 7.5-m *Level 2* DEM ed analizzando l'istogramma di frequenza di tali differenze. In aggiunta confrontano alcuni profili topografici (*transects*), lungo determinate sezioni, con i medesimi profili ricavati da una carta topografica in scala 1:25.000, per l'ASTER DEM del Mt. Fuji, in Giappone, e dagli USGS 7.5-m *Level 2* DEM delle stesse aree, per San Bernardino, in California, e la sopra citata Huntsville.

FALORNI *et alii* (2005), adottano una strategia interessante: definire, con le stesse metodologie, l'accuratezza verticale degli SRTM DEM di due zone topograficamente differenti, perevidenziarne l'influenza sugli errori. I due siti sono il *Little Washita River* (Oklahoma, USA), caratterizzato da bassi rilievi e da morfologie dolci, e il *Tolt River basin* (Washington, USA), caratterizzato da quote maggiori e da una topografia più accidentata. Oltre al calcolo dell'RMSE, sottraendo le quote con quelle derivanti da punti GPS e da USGS DEM, lo studio si concentra sulla caratterizzazione della struttura dell'errore. Al fine di determinare se, e in quale misura, gli attributi topografici influenzano l'entità e il segno delle differenze di quota, vengono, tra le altre analisi, confrontate le differenze con alcuni attributi del terreno quali *elevation*, *slope*, *aspect* e *flow accumulation* derivanti dai *dataset* USGS. Gli autori confrontano anche la posizione dei *No Data pixel* nell'SRTM DEM del *Tolt River basin* con gli attributi del terreno, per evidenziare eventuali correlazioni.

Da tutti questi studi appare chiaro come la validazione dei DEM sia, attualmente, un argomento ancora aperto ed in particolare la loro accuratezza per l'estrazione di parametri geomorfologici. Risulta evidente che l'RMSE sulle quote, da solo, costituisce una valutazione inadeguata della qualità di un DEM e che la sua validazione deve affidarsi a metodologie, diverse ma integrate, che ne valutino la bontà sotto diversi e specifici aspetti.

3. - IL SENSORE ASTER E LE IMMAGINI STEROSCOPICHE

ASTER è un avanzato sensore multispettrale che è stato lanciato, a bordo della navicella TERRA, nel Dicembre del 1999 ed è il frutto di una stretta cooperazione scientifica tra la NASA ed il *Japan's Ministry of Economy Trade and Industry* (METI). Ciascuna immagine ASTER ha uno *swath width* di 60 x 60 km. ASTER copre un'ampia regione spettrale con 14 bande, che vanno dal visibile all'infrarosso termico, con un'alta risoluzione spaziale, spettrale e radiometrica.

Un'aggiuntiva banda nel vicino infrarosso (denominata 3B e con lo stesso *range* spettrale della banda 3N), retro-orientata, garantisce la copertura stereo. Lo strumento ASTER consta di 3 separati sottosistemi: VNIR (*Visibile and Near-infrared*) con 3 bande nel visibile e nell'infrarosso vicino, con una risoluzione spaziale di 15 m e un telescopio aggiuntivo retro-orientato per la copertura stereo; SWIR (*Shortwave Infrared*) con 6 bande nell'infrarosso a corta lunghezza di onda, con una risoluzione spaziale di 30 m e TIR (*Thermal Infrared*) con 5 bande, con una risoluzione spaziale di 90 m. Il sottosistema VNIR consiste di 2 telescopi indipendenti, di cui uno ha l'asse ottico orientato lungo la direzione del *nadir* e l'altro è retro-orientato, assemblati in modo tale da minimizzare la distorsione dell'immagine per entrambi. La configurazione dei 2 telescopi, con un *offset* tra le due direzioni di 27,6°, è tale da fornire un rapporto base/altezza (B/H ratio o parallasse nominale) di 0,6 e consente la acquisizione di coppie stereo digitali *along-track*, secondo tracce di larghezza al suolo di 60 km. Data l'altitudine dell'orbita e la velocità della piattaforma, il sottosistema VNIR impiega 9 sec per acquisire una scena di 60 x 60 km di dimensioni e 64 sec per una scena stereo. Grazie a questo brevissimo intervallo temporale, dovuto al sistema di scansione del sensore di tipo *alongtrack*,

ASTER è in grado di acquisire coppie stereo digitali simultanee, eliminando tutte quelle variazioni nelle condizioni della topografia, dell'atmosfera e dell'illuminazione, presenti nell'acquisizione di dati stereo multitemporali. Questo notevole vantaggio distingue ASTER da tutti gli altri sensori, con capacità stereoscopiche, che lavorano in modalità *cross-track*.

Il sensore ASTER produce due tipi di dati di livello *Level-1*: i dati *Level-1A* (L1A) e *Level-1B* (L1B). I dati L1A consistono di immagini digitali, ai cui pixel viene associato il valore di DN in *output* dal sensore, fornite insieme ai coefficienti di correzione geometrica, di calibrazione radiometrica e di altri dati ausiliari, immagazzinati insieme con i *metadata* nel *file* HDF, i quali, però, non sono stati applicati all'immagine. I dati L1B, invece, sono ottenuti dagli L1A applicando i coefficienti per la calibrazione radiometrica e il ricampionamento geometrico. Di norma le immagini sono proiettate nel sistema di proiezione UTM, secondo il datum WGS84. I dati L1A presentano una dimensione della griglia *raster* differente dai dati L1B e, per entrambi, la banda 3B risulta essere maggiore della 3N. Considerando solo le bande VNIR, le immagini L1A sono costituite da una griglia di 4.100 *pixel* x 4.200 *line*, per la banda 3N, e da 5.000 *pixel* x 5.400 *line*, per la banda 3B. Le immagini L1B, invece, hanno una griglia di 4.980 *pixel* x 4.200 *line*, per la 3N, e di 4.980 *pixel* x 4.600 *line*, per la 3B. A causa delle differenti dimensioni, l'immagine 3B riprende un'area maggiore della corrispondente 3N. Esiste, quindi, una percentuale di *overlap* tra le due bande di circa l'80-90 %. Non solo, ma anche la distorsione dell'immagine è differente: la banda 3B presenta una distorsione sensibilmente maggiore della 3N.

4. - AREA TEST

Il *test* è stato condotto su un'area dell'Italia meridionale, compresa tra le Regioni di Basilicata e Calabria, coincidente all'incirca con la Piana Metapontina, tratto terminale della Fossa Bradanica (dalla foce del Bradano sino al torrente Pagliara a sud di Capo Spulico), e con parte della catena appenninica a sud-ovest, in particolare il lato lucano del Parco Nazionale del Pollino (fig. 1a). Geograficamente l'area rappresenta un quadrangolo che si colloca circa tra i 16° 00' 22" E e i 16° 51' 50" E gradi di longitudine, e i 39° 51' 59" N e i 40° 29' 07" N gradi di latitudine. La sua estensione è di circa

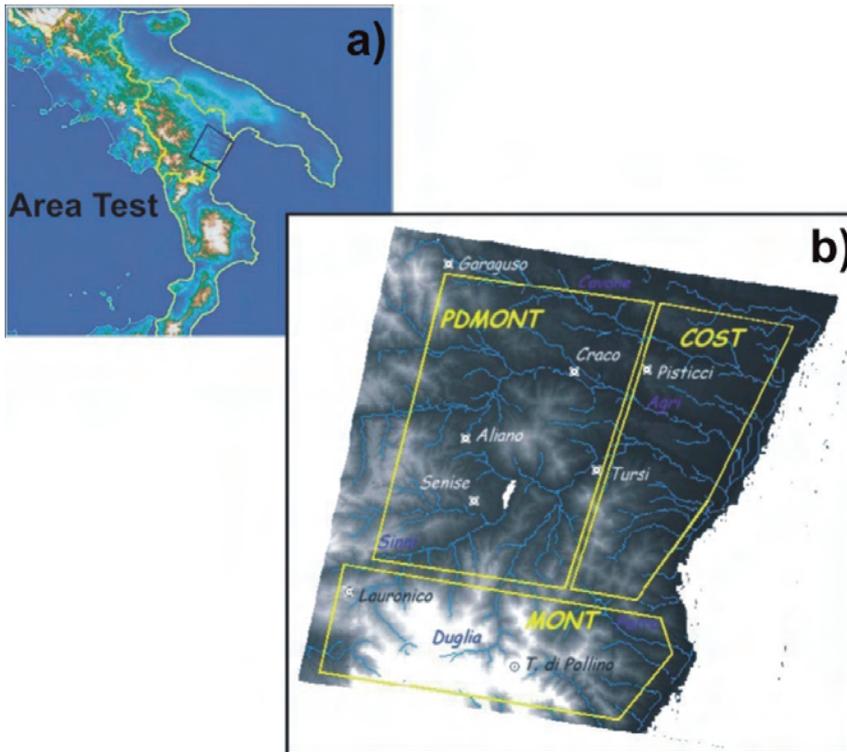


Fig. 1 - a) Ubicazione geografica dell'area di studio. La linea nera evidenzia l'area coperta dall'immagine ASTER. b) Le tre regioni geomorfologiche individuate sull'ASTER DEM sulle quali sono state condotte le analisi.

-a) Geographic location of the test area. The black line points out the area represented in the ASTER image. b) The three geomorphologic regions located on ASTER DEM where the analysis were performed.

3.261 km². L'altimetria è molto variabile nella zona, partendo da una quota minima di 0 m, lungo la costa, e arrivando sino ai 2.175 m sulle vette del Monte Pollino. Al fine di caratterizzare l'influenza della morfologia sull'estrazione di DEM, l'area è stata suddivisa in 3 sub-aree (*regioni*) dalle caratteristiche altimetriche e geomorfologiche più omogenee.

Sono state individuate le seguenti regioni (fig. 1b):

1 - *regione costiera* (denominata COST), con altimetrie non superiori mediamente ai 300 m, che comprende quella parte della Piana Meta-pontina solcata dai tratti terminali dei fiumi Bradano, Basento, Cavone, Agri e Sinni. La morfologia è caratterizzata generalmente da forme dolci del rilievo, inciso dai corsi d'acqua, prevalentemente di tipo *braided*, con valli piuttosto ampie e a basso gradiente.

2 - *regione pedemontana* (denominata PDMONT), con altimetrie non superiori mediamente agli 800 m, compresa tra quella costiera e l'Appennino Lucano più ad ovest. Questa *regione* comprende il tratto pedemontano dei medesimi fiumi sopra menzionati, nonché il Sarmento ed il Serrapotamo. I rilievi sono più pronunciati ma sempre con morfologie abbastanza dolci.

3 - *regione montana* (denominata MONT), con altimetrie non superiori mediamente ai

2.100 m, a sud delle due suddette, comprendente il versante nord-est del Massiccio del Pollino. I corsi d'acqua compresi sono i torrenti Ferro, Straface, Avena, Pagliara e il canale Monaco lungo costa, e i torrenti Duglia, Rubbio, Frido e Raganello sul Massiccio del Pollino. Il territorio è caratterizzato da rilievi aspri ed elevati, incisi profondamente dai corsi d'acqua a carattere torrentizio, con formazione di stretti canyon. I versanti sono generalmente molto acclivi e, in alcuni casi, sub-verticali.

5. - DATI E METODI

Relativamente all'area di studio, sono state acquisite dalla NASA due stereo coppie digitali ASTER, una di livello L1A e l'altra di livello L1B. Per la validazione dei DEM sono invece stati utilizzati i seguenti dati di riferimento:

1 - Un DTM dell'IGM (Istituto Geografico Militare) a 20 m della stessa area di studio. Il dato è stato ottenuto interpolando le curve di livello dell'archivio IGM e i punti quotati digitalizzati. Le coordinate sono piane, espresse in metri, nel sistema di riferimento geodetico ED50, proiezione UTM, riconvertite in seguito in WGS84. Le quote sono espresse in metri sistema di riferimento msl, mareografico di Genova (quote ortometriche). L'errore

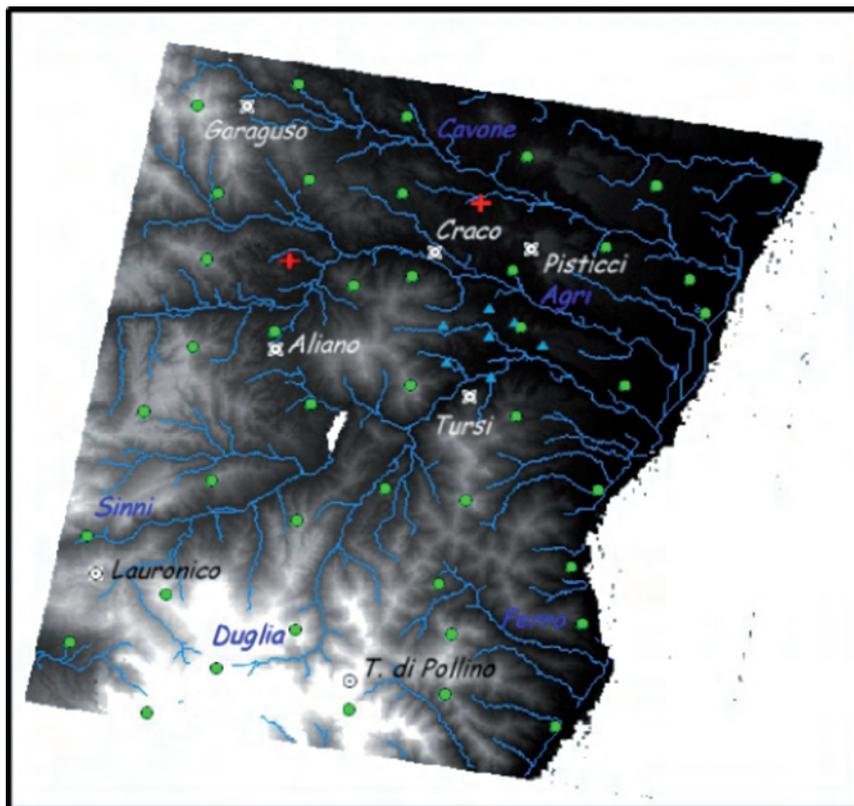


Fig. 2 - Distribuzione dei punti utilizzati per il calcolo dell'RMSE: 7 punti trigonometrici ricavati da ortofotocarte in scala 1:10000, distribuiti nelle zone di Tursi, Montalbano Jonico e Santa Maria D'Anglona (triangoli); 43 punti da tavolette IGM 1:25 000 (cerchi). Sono stati selezionati sia punti trigonometrici che punti quotati.

-Distribution of the points used in the RMSE calculation: 7 trigonometric points derived from orthophoto map 1:10000, distributed among Tursi, Montalbano Jonico and Santa Maria D'Anglona (triangles); 43 points derived from IGM maps 1:25000 (circles). Both trigonometric and elevation points were selected.

riscontrabile non supera i 7-10 m di differenza in altimetria rispetto ai punti appoggio (conosciuti in planimetria e quota), ma questo *range* è fortemente variabile in funzione della zona considerata (metadati IGM).

2 - 7 punti trigonometrici distribuiti nelle zone di Tursi, Montalbano Jonico e S. Maria D'Anglona. I punti sono stati ricavati da ortofotocarte in scala 1:10.000, ed essendo originariamente in coordinate Gauss-Boaga, riconvertiti in WGS84, proiezione UTM. Le quote sono ortometriche (fig. 2).

3 - 43 punti da tavolette IGM 1:25.000. Sono stati selezionati sia punti trigonometrici che punti quotati, in modo omogeneamente distribuito sull'area di studio (fig. 2). Per ogni punto, le coordinate sono state trasformate in WGS84.

6. - ESTRAZIONE DEL DEM E ANALISI DI ACCURATEZZA VERTICALE

L'ASTER DEM è stato estratto con una tecnica di autocorrelazione stereo digitale. Preliminarmente l'attenzione è stata posta sulla procedura di estrazione del software utilizzato (PCI Geomatica v. 9.1, modulo *OrthoEn-*

gine) e sul risultato finale ottenuto, in funzione dei diversi parametri di estrazione utilizzati: *Ground Control Points* (GCPs), *tie points* (TPs) e *stereo Ground Control Points* (stereo GCPs). Avendo a disposizione coppie stereo ASTER sia di livello L1A che L1B della stessa area di studio, è stata eseguita un'analisi comparativa dei risultati ottenuti dai due *dataset* per comprendere quale fonte di dati fosse la più indicata per l'estrazione di DEM.

Tutto questo ha permesso l'individuazione del "miglior" DEM estraibile dai dati in nostro possesso, migliore nel senso della più alta percentuale di area coperta, cioè il DEM col più basso numero di *No Data pixel* ovvero *pixel* per i quali non è stato possibile assegnare una quota (*pixel* falliti).

Il lavoro è stato mirato a valutare l'accuratezza dei DEM da diversi punti di vista: sia sotto il profilo delle quote e degli errori esse legate, sia sotto il profilo dei parametri geomorfologici derivati: pendenze (*slope*), esposizione dei versanti (*aspect*), aree drenanti (*contributing area*), reticolo idrografico (*flow accumulation*). La natura delle analisi è duplice, sia visivo-qualitativa che matematico-quantitativa ed è tesa all'individuazione degli errori e alla loro distribuzione spaziale.

6.1. - L1A OPPURE L1B?

Il confronto tra i DEM ottenibili da i due *dataset* disponibili, di diverso livello, ha previsto la produzione di due ASTER DEM a 15 m, per ciascuna fonte, a crescente numero di GCPs impiegati. La prima coppia di DEM è stata estratta utilizzando il numero minimo indispensabile di 6 GCPs (come raccomandato dal software dell'*OrthoEngine*) e la seconda coppia è stata estratta con l'impiego di 10 GCPs.

La fonte dei GCPs è stata un'ortofoto della Basilicata a 1 m, riferita al datum WGS84, proiezione UTM. Per ciascun punto le quote sono state estratte automaticamente dall'*OrthoEngine* sfruttando il DTM dell'IGM a 20 m, anch'esso in WGS84. In entrambi i casi il numero dei TP's adoperati, pari a 12, è rimasto invariato. Ovviamente, affinché il raffronto abbia senso, sono stati collezionati gli stessi GCPs e TP's per entrambi i *dataset*.

L'analisi è stata focalizzata sia sul valore di RMSE_{xy} ottenuto in fase di raccolta dei punti per entrambe le bande 3N e 3B delle coppie stereo sia sul numero di *No Data pixel* riscontrato nei DEM. Per rigore di chiarezza, occorre puntualizzare che il valore di *No Data* è stato assegnato ai *pixel* privi di quota. Questi sono dovuti sia a veri e propri *pixel* falliti, risultanti dalla mancata correlazione stereo, sia a quei *pixel* privi di quota poiché giacciono al di fuori della zona di *overlap*. Questi ultimi, tuttavia, sono presenti praticamente in egual numero in tutti i DEM prodotti, poiché quasi identica risulta la zona di *overlap* per entrambi i *dataset*.

La tabella 1 mostra come, nel collezionare GCPs, si riscontri costantemente un maggior valore dell'RMSE dei dati L1B rispetto a quelli L1A, per entrambe le bande ed in entrambe le prove. Stesso andamento, ma con differenze nettamente più marcate, è stato riscontrato per l'RMSE dei TP's (tab. 2).

La seconda analisi per i due *dataset* è stato il numero dei *No Data pixel* riscontrati nei vari DEM. In tabella 3 vengono presentati il numero dei *No Data pixel*, riportati come percentuali rispetto al numero totale di *pixel* costituenti la griglia *raster* dei DEM. Anche in questo caso è stato riscontrato un netto divario tra i due *dataset* a favore dei dati L1A (fig. 3).

Queste analisi comparative hanno permesso, quindi, di verificare che per la produzione di ASTER DEM risultano più indicati i dati di livello L1A rispetto agli L1B, confermando la direzione seguita dal *Land Processes DAAC* della NASA.

TAB. 1 - RMSE_{xy} dei medesimi GCPs utilizzati nell'estrazione di ASTER DEMs da dataset L1A e L1B.
- RMSE_{xy} of the same GCPs used for the extraction of ASTER DEMs from L1A and L1B datasets.

ASTER DEMs		L1A	L1B
6 GCPs	RMSE 3N (pixel)	0,09	0,24
	RMSE 3B (pixel)	0,16	0,22
10 GCPs	RMSE 3N (pixel)	0,85	0,96
	RMSE 3B (pixel)	0,60	1,25

TAB. 2 - RMSE_{xy} dei medesimi TP's utilizzati nell'estrazione di ASTER DEMs da dataset L1A e L1B.
- RMSE_{xy} of the same TP's used for the extraction of ASTER DEMs from L1A and L1B datasets.

12TPs	L1A	L1B
X RMSE (pixel)	1,23	4,13
Y RMSE (pixel)	0,13	3,94

TAB. 3 - Percentuali di No Data pixel per gli ASTER DEMs estratti da dataset L1A e L1B.

- Per cent values of No Data pixels of the ASTER DEMs derived from L1A and L1B datasets.

ASTER DEMs	% No Data pixel L1A	% No Data pixel L1B
6 GCPs	1,535	9,733
10 GCPs	0,318	2,229

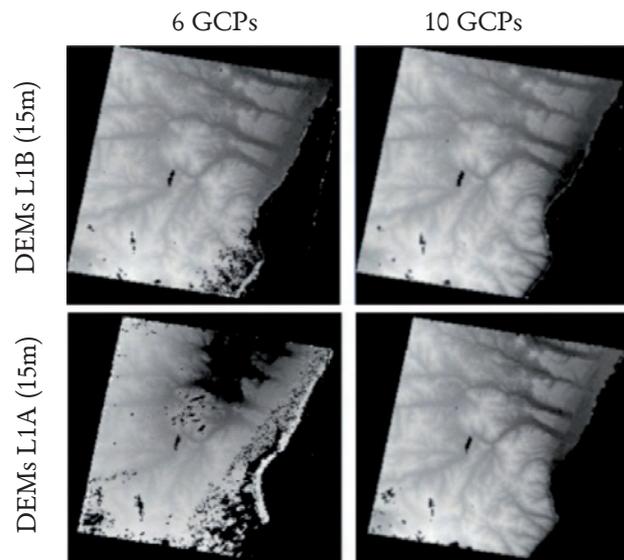


Fig. 3 - Variabilità del numero di *No Data pixel* (macchie nere) tra i DEMs estratti da i *dataset* L1A e L1B utilizzando 6 e 10 *Ground Control Point* (GCPs).

- Variability of number of *No Data pixels* (black spots) between DEMs derived from L1A and L1B datasets using 6 and 10 *Ground Control Point* (GCPs).

6.2. - GCPS, TPS, STEREO GCPS: QUALE LA GIUSTA COMBINAZIONE?

Una volta individuato il *dataset* più idoneo per l'estrazione del DEM, è stato esaminato il problema di quali fossero i parametri da utilizzare, e in quale combinazione, per la procedura di autocorrelazione stereo, al fine di ottenere il risultato migliore possibile. Ribadiamo che abbiamo considerato il DEM "migliore" estraibile quello che presenta il minor numero di *No Data pixel*. Questo è stato fatto poiché, variando il numero e la distribuzione dei GCPS e dei TPS, i valori delle elevazioni che si ottengono, mediamente, non subiscono rilevanti differenze mentre questo non accade per la percentuale di copertura dell'area, che ne risulta fortemente influenzata, come mostrato nelle analisi qui di seguito riportate.

Il software *OrthoEngine* offre due soluzioni per l'estrazione di un ASTER DEM:

a) Collezionare esclusivamente stereo GCPS (gli stessi punti collezionati su entrambe le immagini della coppia stereo), poiché questi fungono anche da TPS nel processo di coregistrazione delle immagini.

b) Collezionare GCPS diversi per le immagini 3Ne 3B insieme ai TPS. Sono state vagliate entrambe le possibilità, investigando le capacità operative del software e testando i dati a nostra disposizione, sempre nell'ottica della ricerca del risultato più soddisfacente possibile. Partendo dal numero minimo necessario di GCPS consigliato, sono stati estratti DEM a 15m, a numero crescente di GCPS, adottando un passo di 4 punti per la successione di produzione. Per entrambe le soluzioni sono state eseguite 7 prove: a 6, a 10, a 14, a 18, a 22, a 26 e a 30 GCPS. In tutte le prove svolte il valore di RMSE dei GCPS e dei TPS collezionati è stato mantenuto sotto il valore di un *pixel*. La scelta della dimensione di cella di 15 m si basa sull'intenzione di confrontare i vari risultati alla risoluzione più alta e al più alto grado di dettaglio consentiti dal software, in modo da svolgere le analisi al livello più minuzioso possibile.

I nostri risultati non hanno confermato l'opzione consigliata dalla documentazione del software degli stereo GCPS, poiché in tutte le prove, tranne che in quella a 6 punti, è stato riscontrato costantemente un numero di *No Data pixel* leggermente superiore rispetto a quello caratterizzante i DEM ottenuti con GCPS e TPS. Di conseguenza l'attenzione è stata spostata solo sul secondo metodo di estrazione.

Come è evidente nel grafico di figura 4, l'andamento riscontrato nei risultati delle prove, svolte utilizzando GCPS diversi per le due immagini e TPS, evidenzia un intervallo di minimi valori compreso tra i 10 e i 14 GCPS. In funzione di ciò, è stato sondato questo intervallo con un passo più piccolo, 2 GCPS, estraendo altri due DEM rispettivamente a 8 e a 12 GCPS. Quest'ultimo ha presentato i valori più bassi di tutte le nostre prove, rappresentando un minimo sul grafico ad istogramma e costituendo, così, il "miglior" ASTER DEM ottenuto. Tutte le analisi successive sono state basate su questo dato.

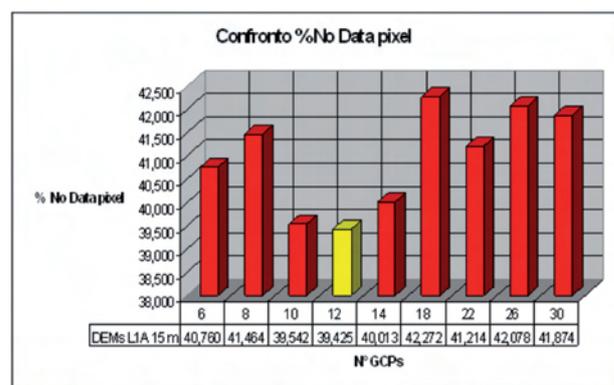


Fig. 4 - Istogramma delle percentuali di *No Data pixel* per i soli DEMs estratti da *dataset* L1A in relazione al numero di GCP utilizzati. È possibile notare come esista un *optimum* corrispondente a 12 GCPS.
- Histogram of the per cent values of *No Data pixels* of the DEMs derived from L1A dataset only with respect to the number of used GCPS. It's possible to notice the existence of an *optimum* in the position of 12 GCPS.

7. - L'ERRORE E LA SUA DISTRIBUZIONE SPAZIALE

I due *dataset* di punti di riferimento (2, 3) sono stati utilizzati per il calcolo dell'RMSE sia del nostro DEM che del DTM IGM (tab. 4). Entrambi i *dataset* sono stati ricampionati a 30 m, dimensione scelta come risoluzione di riferimento.

I risultati mostrano che, nel caso dei 7 punti trigonometrici e dei 43 punti IGM, il DTM si è rivelato più accurato del nostro ASTER DEM, con una differenza nei valori RMSE. Occorre sottolineare che per tutte e tre i *dataset* l'ASTER RMSE non ha superato il valore di 26 m circa, risultando in accordo con le previsioni dell'ADEM WG, che indicavano valori compresi tra $\pm 10-50$ m e generalmente all'incirca pari alla risoluzione del *pixel*.

Un aspetto importante da analizzare è la struttura spaziale degli errori presenti nel-

TAB. 4 - Confronto tra l'RMSE dell'ASTER DEM e del IGM DTM, entrambi con una pixel size di 30 m.
- Comparison between ASTER DEM and IGM DTM RMSE, both having a pixel size of 30 m.

PUNTI	RMSE ASTER DEM (m)	RMSE DTM (m)
7 punti trigonometrici	26,199	10,285
43 punti IGM	22,645	4,569

l'ASTER DEM, cioè occorre capire come sono distribuiti nello spazio, dove si concentrano gli errori minori e dove quelli maggiori e se esiste una correlazione con le caratteristiche topografiche. Tale analisi risulta di fondamentale importanza per distinguere l'eventuale presenza di zone del DEM più accurate dalle altre dove gli errori, troppo elevati, non ne permetterebbero un'affidabile utilizzo. A tale scopo è stato preso come riferimento sempre il DTM IGM.

Un prima considerazione può essere ricavata dal confronto tra gli istogrammi di frequenza dei due DEM. La figura 5 evidenzia un andamento piuttosto simile delle due curve, anche

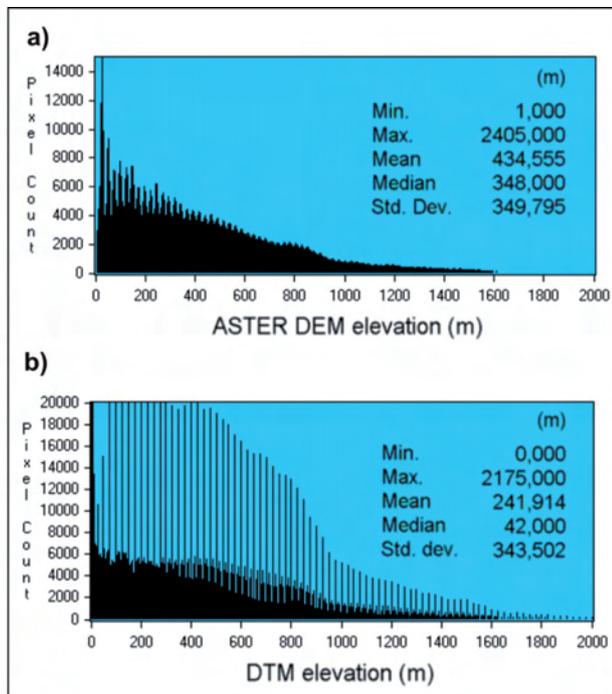


Fig. 5 - Istogrammi di frequenza dei due DEMs: a) ASTER DEM; b) IGM DTM. Si noti come l'IGM DTM presenti picchi di quote di spaziatura costante. Questo effetto è un tipico artefatto dei DEMs estratti da interpolazione di curve di livello.

- Frequency histograms of the two DEMs: a) ASTER DEM; b) IGM DTM. Notice that IGM DTM shows elevation peaks at constant spacing. This effect is a typical artefact of DEMs derived from interpolation of contours.

se l'istogramma del DTM mostra la presenza di una serie di picchi equidistanziati poco verosimili. In realtà si tratta di un noto artefatto tipicamente presente nei DEM estratti per interpolazione da curve di livello dovuto ad un bias delle isoipse (CAPOLONGO, 1999).

Lo scatterogramma dei due dataset (fig. 6a) permette di valutare quale sia il grado di correlazione esistente tra i dati in esame. Nel nostro caso è stata riscontrata una buona correlazione tra i dati. Lo scatterogramma mette in evidenza, in realtà, anche una serie di pixel non allineati e allungati lungo l'asse X. Il loro andamento sul grafico indica che questi pixel presentano sull'ASTER DEM un valore molto alto e, viceversa, molto basso sul DTM (prossimo a 0). Si tratta di una serie di pixel non falliti ma errati, per i quali l'autocorrelazione stereo è riuscita ma il software ha estratto delle quote molto alte. Tutti questi punti sono localizzati, sull'ASTER DEM, esclusivamente lungo la linea di costa e mostrano valori assolutamente anomali, troppo alti per essere verosimili. Sono pixel ubicati nella zona di spiaggia, margine del mare, ovunque rappresentato da *No Data pixel* sull'immagine. A *No Data pixel* corrispondono anche le aree del Lago di Monte Cotugno (diga della Val Senise che sbarra il Sinni) del Lago di Gannano, (diga che sbarra l'Agri) e tutti gli specchi d'acqua presenti nel dataset stereo.

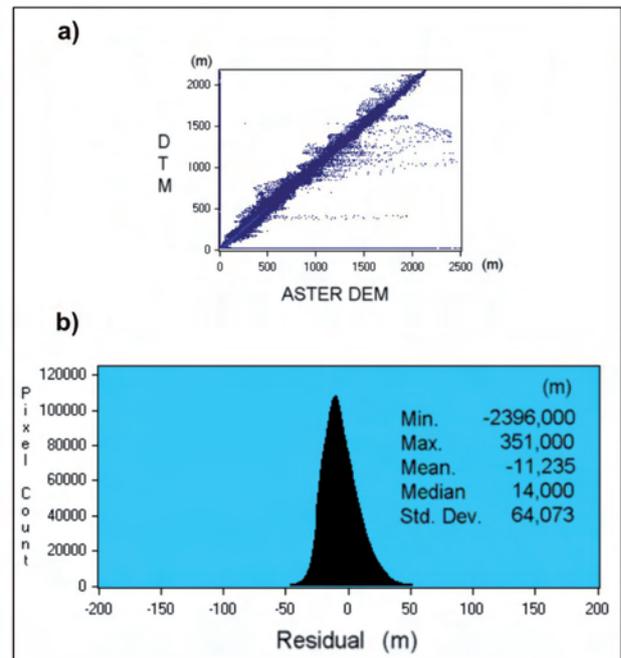


Fig. 6 - a) Scattergramma dei due DEMs; b) distribuzione statistica dei residual per gli stessi DEMs.

- a) Scattergram of the two DEMs; b) statistic distribution of residuals for the same DEMs.

Lo scatterogramma ha permesso inoltre l'individuazione di questi *pixel* al contrario degli istogrammi, dove risultano difficilmente distinguibili. Per evidenziare ancora meglio la distribuzione spaziale degli errori è stata eseguita un'operazione di sottrazione algebrica tra *raster*. L'analisi quantitativa per sottrazione prevede la sovrapposizione dei due DEM a 30 m, ottenibile grazie alla congruenza del sistema di proiezione e del *datum* di questi, e il calcolo della differenza dei valori delle quote per ciascun *pixel*. In output si ottiene un *raster* dei valori delle differenze (*residual*) tra i due *dataset*, cioè la rappresentazione della distribuzione spaziale degli errori. In questo caso al DTM IGM è stato sottratto l'ASTER DEM.

L'istogramma di frequenza dei *residual* (fig. 6b) rivela una forma a campana della distribuzione delle differenze, con una leggera asimmetria a favore dei valori negativi. Questo è confermato dalle statistiche riportate sul grafico, secondo le quali il valore medio delle differenze si attesta intorno ai -11 m circa. I valori min. e max, così elevati, sono sempre dovuti a singoli *pixel* errati ed isolati. Non si riscontrano andamenti preferenziali delle frequenze (ad es. bimodalità, ecc.): la distribuzione dei valori è quindi approssimabile ad una distribuzione normale.

I valori dei *residual* possono essere dovuti, tra le altre cause, al grado di bontà della procedura di *image matching*. Se il *software* non correla esattamente una coppia di punti omologhi, accade che il *pixel* di un'immagine venga accoppiato ad un suo limitrofo dell'altra immagine. Questo, ovviamente, falsa la quota estratta per quella coppia poiché i due punti non rappresentano precisamente la stessa area, bensì zone contigue. Al fine di valutare possibili correlazioni tra i *residual* e i risultati della procedura di *matching*, sono stati riportati in uno scatterogramma i punteggi di correlazione (0 punteggio minimo e 100 punteggio massimo), plottati verso i *residual* (fig. 7).

Il grafico non mostra alcuna correlazione particolare evidenziando come la distribuzione dei *residual* sia indipendente dal grado di *image matching*. Sono ravvisabili, tuttavia, due concentrazioni principali rispetto ai *residual*: una attorno al valore 0, ricoprente tutti i valori dei punteggi di correlazione, e l'altra compresa nell'intervallo [-300; -1.000], con punteggi non inferiori a 30. Questo significa che ci sono dei *pixel* per i quali, pur essendo stato preciso il *matching*, le differenze di quota col DTM risultano considerevoli.

Il *dataset* dei *residual* può essere utile soprat-

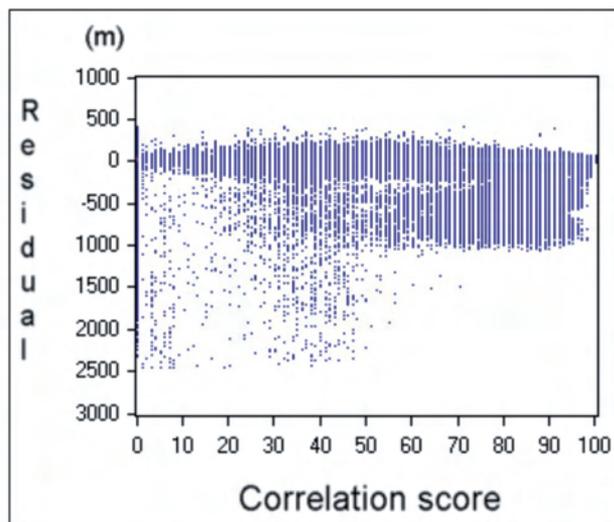


Fig. 7 - Scatterogramma dei *residual* contro i punteggi di correlazione (*correlation score*) indicativi della bontà della procedura di *image matching* (0 = scarsa; 100 = ottima). Si noti come i *residual* non siano generalmente influenzati dai punteggi di correlazione.

- Scattergram of *residuals* against *correlation scores* representing the quality of the *image matching* procedure (0 = poor; 100 = best). Notice that in general *residuals* are not influenced by *correlation scores*.

tutto per analizzare se l'altimetria dell'area di studio influenza in qualche modo i valori delle differenze: può accadere, ad esempio, che taluni valori delle differenze siano associati a delle quote specifiche, che le differenze maggiori siano associate alle quote minori o viceversa, ecc.

Adoperando sempre uno scatterogramma (fig. 8) è stato possibile investigare se, e in che modo, l'altimetria influisce sugli errori. Sul grafico sono stati riportati i valori delle quote

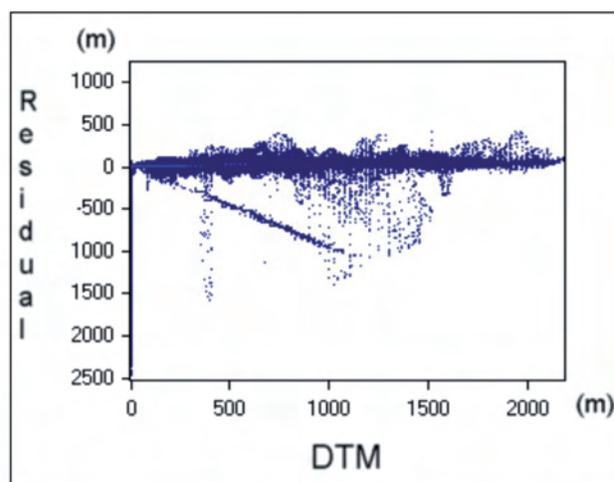


Fig. 8 - Scatterogramma delle quote del DTM contro i *residual*. L'andamento quasi perfettamente rettilineo dei punti non evidenzia nessuna correlazione specifica tra le due variabili.

- Scattergram of the DTM elevations against *residuals*. The almost perfectly rectilinear trend of points doesn't show any specific correlation between the two parameters.

del DTM IGM contro quelli dei *residual*. Anche in questo caso l'andamento perfettamente rettilineo dei punti non evidenzia nessuna correlazione specifica tra i due *dataset*.

I punti allineati obliquamente al di sotto della concentrazione rettilinea principale testimoniano una proporzionalità inversa, per alcuni *pixel*, al di sotto dei 1.000 m. Questa leggera correlazione tra i *dataset*, tuttavia, è rappresentata da un numero esiguo di punti.

Per comprendere effettivamente se l'entità degli errori sia o meno influenzata dalla variabilità altimetrica e dalla morfologia presente in tutto l'ASTER DEM, sono state calcolate le statistiche dei *residual* per ciascuna delle tre regioni individuate precedentemente (tab. 5). I valori dei parametri considerati mostrano sensibili e significative differenze.

Tab. 5 - *Statistiche dei residual delle tre region.*
- Statistics of residuals of the three regions.

RESIDUAL	AREA (mq)	MEAN (m)	MEDIAN (m)	STD. DEV.
COST	52.567.200	-14,258	-15,000	9,158
PDMONT	103.811.040	-9,249	-10,000	11,158
MONT	59.927.040	1,827	0,000	15,668

I parametri statistici utilizzati per comprendere la distribuzione spaziale degli errori, sono quelli di media e mediana. Per le regioni COST e PDMONT entrambi i valori sono negativi: questo indica che gli errori sono prevalentemente concentrati nel semi-campo negativo delle differenze e che hanno valori assoluti maggiori di quelli del semi-campo positivo. Il contrario avviene per la regione MONT, dove la mediana, dividendo esattamente in due parti uguali le differenze negative e positive, non mostra una concentrazione preferenziale degli errori, la cui media risulta essere il valore più basso riscontrato. È interessante notare l'andamento parallelo, per i parametri media e mediana, che mostrano le 3 regioni: a partire dalla regione COST fino alla regione MONT si osserva un graduale e persistente aumento dei valori, che da negativi diventano positivi. Sembra quindi che all'aumentare dell'altimetria, dalla costa all'entroterra, gli errori passino dai valori negativi e maggiori riscontrati verso quelli minori e positivi, arrivando sino ad una media di soli 1,8 m circa. Questo significa che il nostro ASTER DEM risulta, tendenzialmente, sottostimare le

quote reali nella zona costiera e pedemontana e risultare, invece, maggiormente accurato in quella montana. I risultati vengono anche confermati da due profili topografici che sono stati realizzati all'interno dell'area di studio (fig. 9).

Il primo attraversa da est a ovest la zona montana e il secondo da sud a nord quella costiera. In effetti, se si osservano i profili topografici della sezione 1 (fig. 10a), si può constatare come questi combacino perfettamente lungo quasi tutto il tracciato. I profili della sezione 2 (fig. 10b), invece, combaciano solo nella prima parte del tracciato, relativa alla zona montuosa più a sud, e si discostano nella seconda metà di questo, lungo la Piana Metapontina più a nord. Anche in quest'ultimo caso, però, l'andamento del profilo viene preservato, risultando solo traslato verso quote maggiori.

La particolare distribuzione spaziale degli errori, oltre che all'altimetria, può essere dovuta alla topografia dell'area e alle sue caratteristiche geomorfologiche, quali pendenze, esposizione dei versanti, aree drenanti, ecc. L'eventuale influenza di questi attributi topografici sugli errori dell'ASTER DEM è stata valutata estraendo alcune superfici derivate, quali pendenza, esposizione dei versanti e reticolo idrografico, dal DTM IGM e confrontandole con i *residual* (fig.11). Per l'estrazione di tali superfici sono state adoperate le funzioni di *Arc Hydro Tools*, all'interno del modulo *ArcMap* del software *ArcGis v. 9.0*.

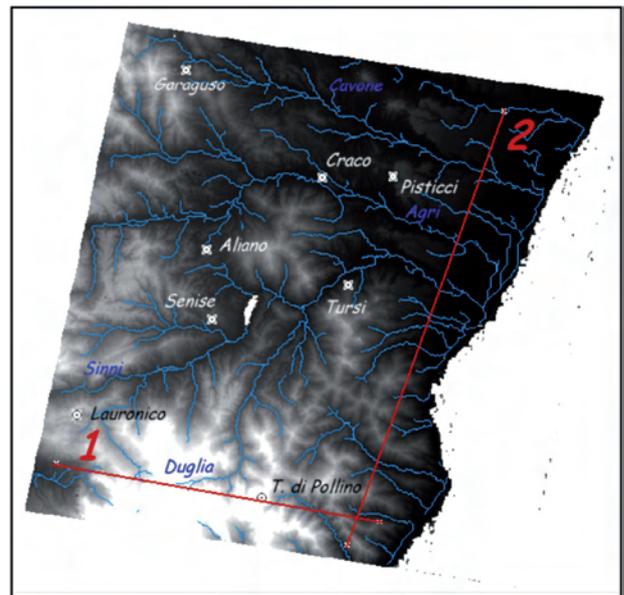


Fig. 9 - L'ubicazione delle due sezioni topografiche estratte dall'ASTER DEM e dall'IGM DTM.

- Location of the two topographic sections derived from ASTER DEM and IGM DTM.

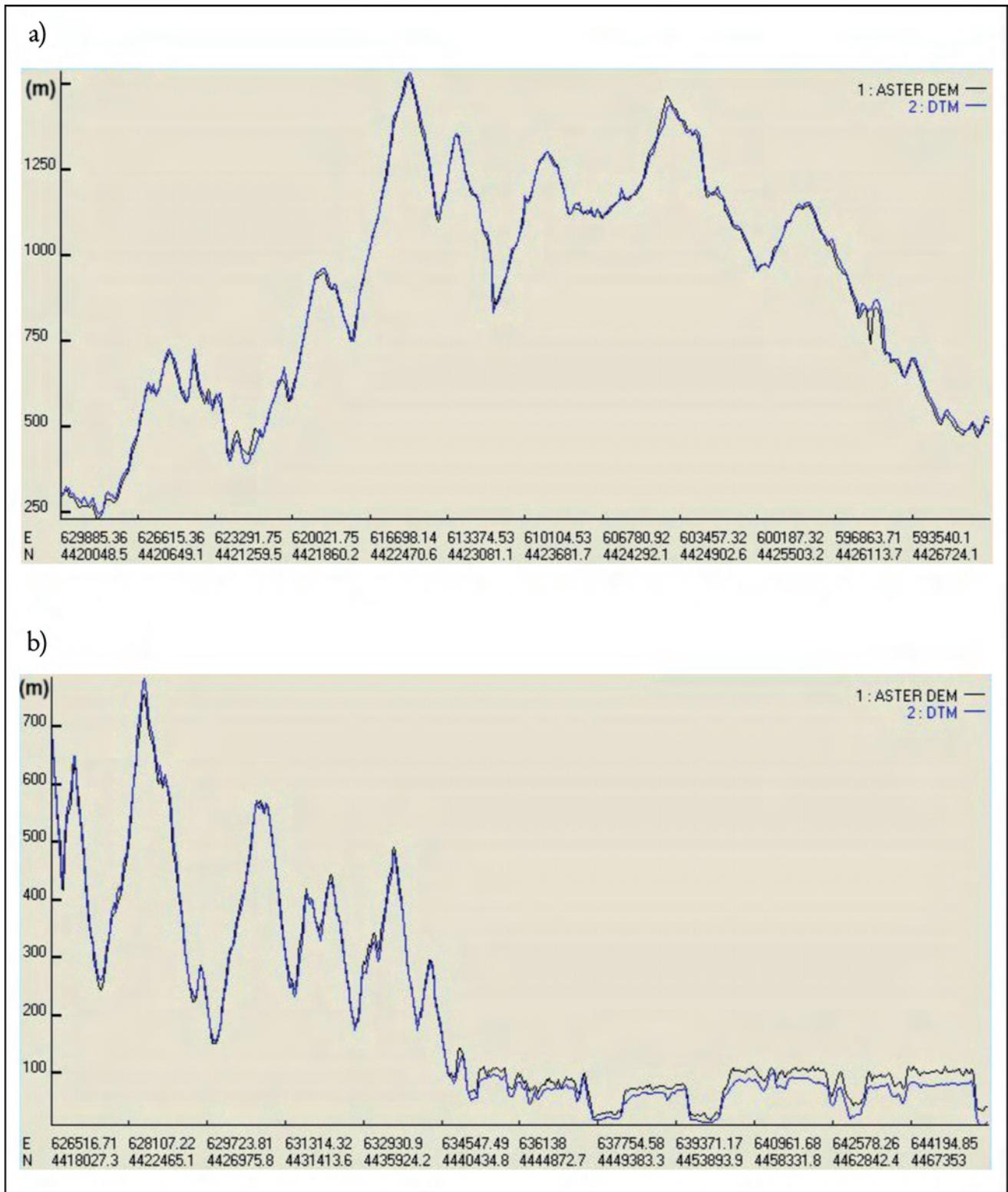


Fig. 10 - a) profilo topografico della sezione 1; b) profilo topografico della sezione 2 (ubicazione delle sezioni in fig. 9).
 - a) topographic profile of section 1; b) topographic profile of section 2 (location of sections shown in fig. 9).

Nel caso delle pendenze, i *residual* non sembrano influenzati se non per pochi punti, di bassa frequenza, che mostrano un andamento pressochè iperbolico, relativamente a valori superiori ai 70° . Nello stesso *range* di pendenze si trovano, però, al di sopra di questi, altri punti con valori dei *residual* circa uguali a 0. Su alcuni dei pendii più acclivi, sub-verticali, quindi, gli errori sono notevoli e di segno negativo.

Andamento perfettamente rettilineo mostra lo scatterogramma relativo all'esposizione. In questo caso, l'esposizione dei versanti non sembra influire minimamente sugli errori. In realtà, osservando bene il grafico, è possibile notare una serie di piccole scie verticali di punti di bassa frequenza. Ricadendo esattamente nello stesso *range* di valori di *residual*, questi punti sono i medesimi di quelli ad andamento iperbolico dello scatterogramma precedente. Essi individuano

in questo caso valori di esposizione compresi tra 270° e 320° circa (versanti esposti a nord-ovest). Questo significa che i pendii sub-verticali suddetti, per i quali l'ASTER DEM produce gli errori maggiori, rappresentano versanti esposti a ovest-nord-ovest. Si tratta, comunque, di pochissimi casi. Gli altri versanti sub-verticali presenti nell'area, non aventi però la stessa esposizione, mostrano errori molto più ridotti e sono rappresentati sullo scatterogramma delle pendenze da quei pochi punti con valore dei *residual* prossimi allo 0.

Il caso del *flow accumulation* rivela una influenza più marcata sui *residual*. Il grafico indica che il maggior *range* di variabilità dell'errore corrisponde a zone di pendio e di spartiacque (bassi valori del *flow accumulation*), mentre nei canali e nei reticoli idrografici (alti valori del *flow accumulation*) gli errori sono ridotti.

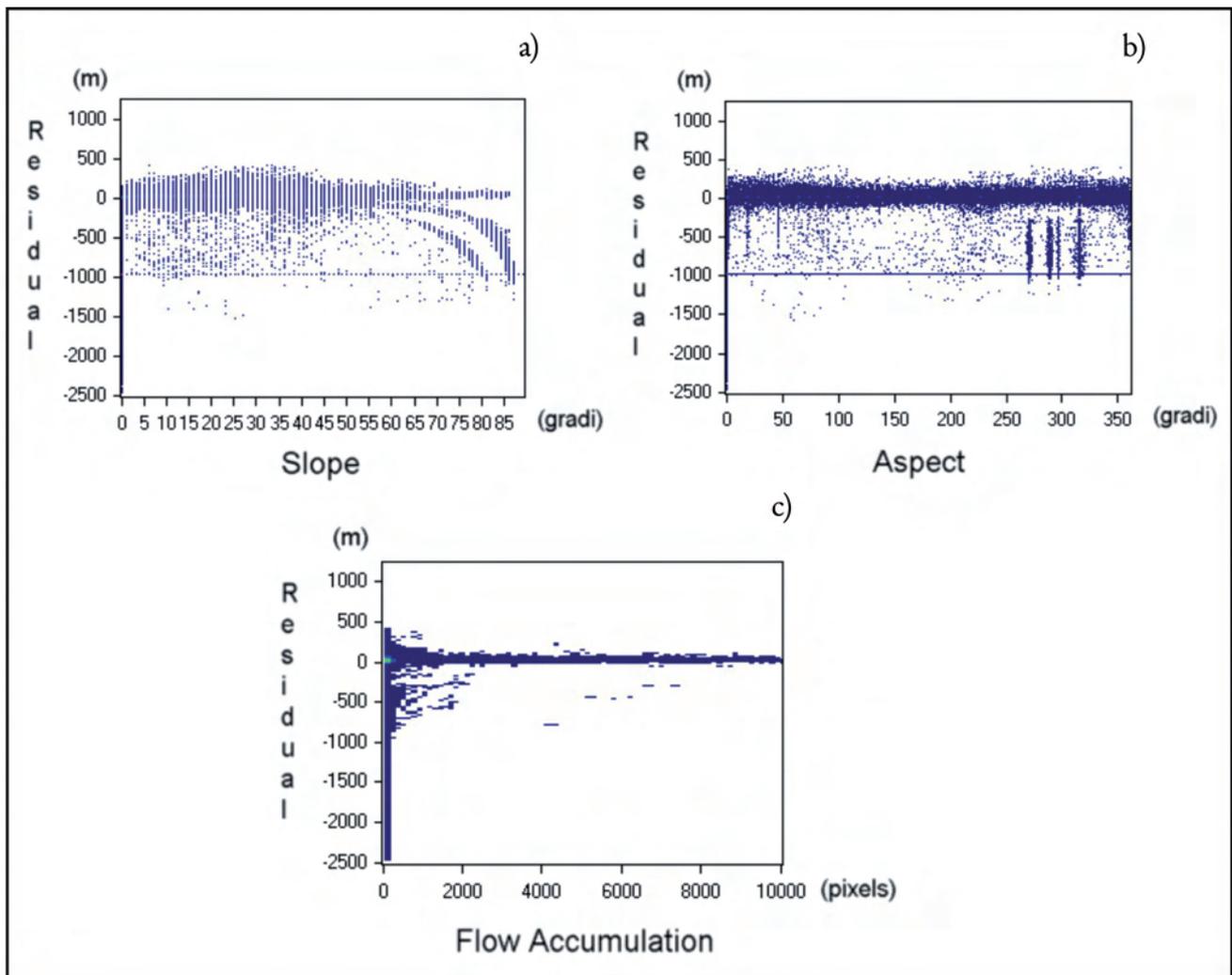


Fig. 11 - Scattergrammi dei *residual* contro: a) pendenze (*slope*); b) esposizione dei versanti (*aspect*); c) aree drenanti (*flow accumulation*).
- Scattergrams of residuals against: a) *slope*; b) *aspect*; c) *flow accumulation*.

8. - L'INFLUENZA DELL'ERRORE SUI PARAMETRI GEOMORFOLOGICI DERIVATI

Nella pratica odierna i DEM vengono spesso utilizzati per estrarre parametri geomorfologici quali pendenze (*slope*), esposizione dei versanti (*aspect*), e reticolo di drenaggio (*flow accumulation*). Le analisi condotte vengono quindi indirizzate su questi parametri, e in particolare sulla loro qualità e affidabilità. Analogamente a quanto fatto per le quote, sono state estratti, sia dall'ASTER DEM che dal DTM IGM, i valori di *slope*, *aspect* e *flow accumulation* e ne sono state analizzate le differenze. Tutte le analisi sono state condotte anche in questo caso per le tre regioni considerate.

L'istogramma di frequenza delle differenze degli *slope* (fig. 12a) è una curva quasi perfettamente simmetrica, costituita da punti con ampia variabilità dei valori ma bassa frequenza, dalla quale si erge un picco, molto ben definito, di massima frequenza e di valori molto prossimi allo zero. La curva indica dunque che, al di là di pochi casi, per i quali si riscontrano alte differenze sia negative che positive, la maggior parte dei valori ricade in uno stretto intervallo attorno al valore 0. Ciò vuol dire che i valori delle pendenze generalmente coincidono per entrambi i *dataset* coincidono, come confermato dalle statistiche che riportano, come valor medio, una differenza di appena 0,24 gradi circa.

Caso analogo al precedente, anche se con statistiche diverse, presentano i valori delle differenze degli *aspect*, il cui istogramma riproduce lo stesso andamento ma con un maggiore *shift* verso i valori negativi (fig. 12b).

Come nella precedente analisi della distribuzione spaziale degli errori sulle quote, anche in questo caso l'interesse è quello di analizzare gli errori sui prodotti derivati non relativamente a tutto il DEM, ma in funzione di sue sub-aree, al fine di caratterizzare la qualità di tali prodotti a livello più specifico. In quest'ottica sono state ricalcolate le statistiche delle differenze dei valori di *slope* e *aspect* per le 3 regioni individuate precedentemente.

Nel caso degli *slope*, poiché il valore della pendenza di un pendio dipende essenzialmente dalla stima della sua quota (un errore sulla quota, piccolo o grande, influenza, rispettivamente poco o molto, il valore della pendenza da questa calcolato), ci si dovrebbe aspettare un andamento dei risultati di accuratezza delle 3 regioni simili a quelli ottenuti per le altimetrie.

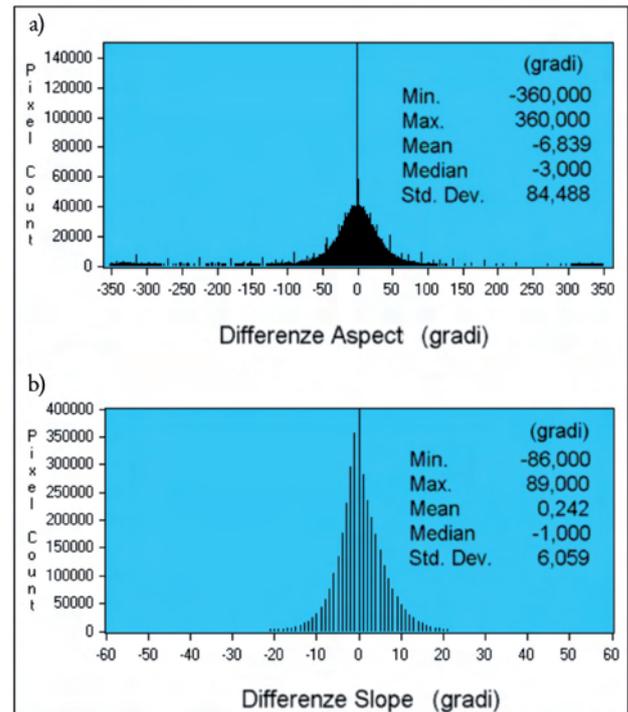


Fig. 12 - Istogramma di frequenza delle differenze tra ASTER DEM e IGM DTM relativamente a: a) aspect; b) slope.
- Frequency histogram of differences between ASTER DEM and IGM DTM with reference to: a) aspect; b) slope.

In realtà, se si guardano le statistiche riportate in tabella 6, si nota che le differenze dei valori delle 3 regioni sono molto piccole, in particolare quelle di media e mediana, di maggiore interesse.

In altre parole, gli errori sulle pendenze non sembrano avere una distribuzione spaziale preferenziale e non risentono dei *residual* delle quote, dalle quali provengono. Questi risultati sono probabilmente dovuti al fatto che, nonostante le differenze di quota esistenti tra il DTM e l'ASTER DEM, in certi casi anche rilevanti, l'andamento topografico generale viene rispettato a parte rare eccezioni, come abbiamo già riscontrato per i due profili analizzati precedentemente.

TAB. 6 - Statistiche delle differenze dei valori di slope per le tre regioni.

- Statistics of value differences of slope for the three regions.

SLOPE	MEAN (gradi)	MEDIAN (gradi)	STD. DEV.
COST	-0,408	-1,000	4,515
PDMONT	-0,553	0,000	6,072
MONT	1,333	1,000	6,767

TAB. 7 - Statistiche delle differenze dei valori di aspect per le tre regioni.

- Statistics of value differences of aspect for the three regions.

ASPECT	MEAN (gradi)	MEDIAN (gradi)	STD. DEV.
COST	-16,430	-6,000	115,662
PDMONT	-2,631	-3,000	104,253
MONT	0,420	0,000	99,494

Le statistiche relative agli *aspect*, invece, risultano diverse a seconda della regione che si considera (tab. 7).

In questo caso si ripresenta l'andamento già incontrato nelle statistiche dei *residual*: a partire dalla *regione cost* fino a quella *mont*, i valori di media e mediana passano da alti e negativi a bassi e positivi, arrivando sino ad una differenza media minima di soli 0,4 gradi circa. Anche per quanto concerne l'esposizione dei versanti, dunque, la *regione mont* risulta la più accurata.

Un'ultima analisi ha riguardato il confronto dei reticoli idrografici estraibili dal DTM e dal nostro DEM. L'estrazione è stata eseguita sempre con *Arc Hydro Tools*, scegliendo un valore pari allo 0,3 % del massimo valore del *flow accumulation* come soglia per l'estrazione da en-

trambi i *dataset*.

La figura 13 mostra i due DEM su cui sono stati sovrapposti i file vettoriali dei rispettivi reticoli idrografici. Una prima rilevante differenza che è possibile subito notare riguarda la zona costiera: sull'ASTER DEM (fig. 13a) i corsi d'acqua della Piana Metapontina, tra cui il Bradano, il Basento, il Cavone, l'Agri e il Sinni, e quelli della costa calabrese, tra cui il Ferro, lo Straface, l'Avena e il Saraceno, giunti in prossimità del mare, deviano tutti verso sud, quasi ad angolo retto, finendo per unirsi tra di loro. Sul DTM (fig. 13b), invece, tutti questi sfociano naturalmente in mare senza deviare il loro corso, ortogonalmente alla costa. Questo è dovuto alla presenza di *pixel* errati lungo costa che, avendo sull'ASTER DEM una quota decisamente troppo alta rispetto ai *pixel* circostanti, rappresentano un ostacolo per i corsi d'acqua che vengono quindi deviati.

Altre differenze è possibile scorgere sovrapponendo i due reticoli, come mostrato dalla figura 13c, e a questi le regioni individuate nell'area, per analizzare i dati sempre in termini di sub-aree. Il reticolo nella *regione MONT* e *PDMONT* si dimostra essere il più accurato. Questo risultato era prevedibile sulla base di quelli ottenuti per le pendenze e, ancor di più, per le esposizioni.

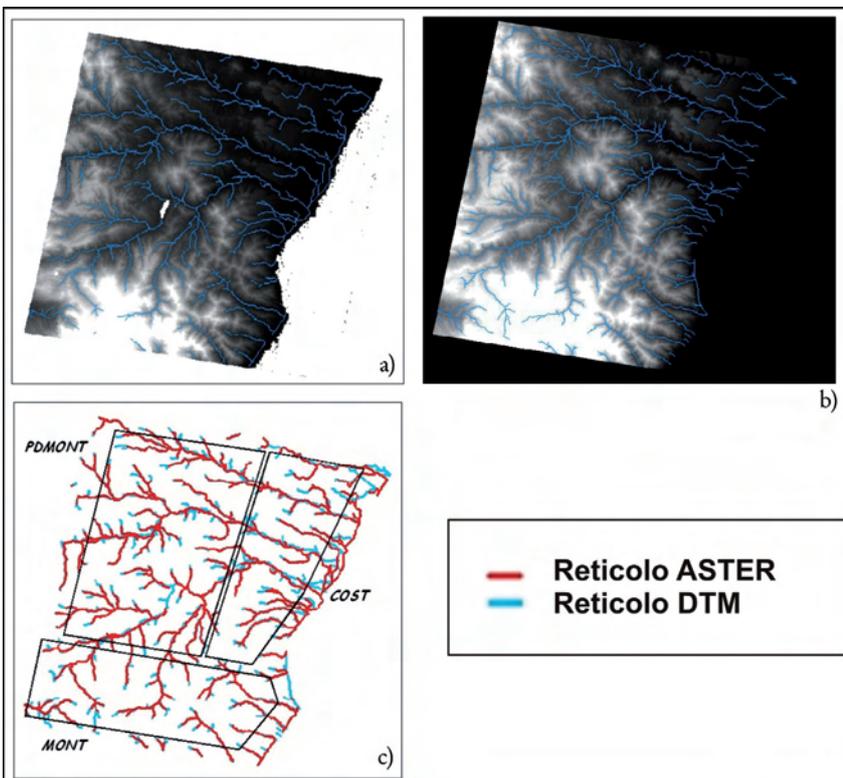


Fig. 13 - Reticoli idrografici estratti da: a) ASTER DEM; b) IGM DTM; c) sovrapposizione dei due reticoli idrografici nelle diverse regioni considerate.

- Hydrographic networks derived from: a) ASTER DEM; b) IGM DTM; c) overlay of the two hydrographic networks in the different considered regions.

9. - CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dalle analisi validate dell'ASTER DEM a 30 m hanno mostrato chiaramente che, sebbene l'errore riscontrabile medio (come RMSE) sia compreso tra i 19 m e i 26 m circa e sia comunque inferiore alla risoluzione del *pixel*, confermando le previsioni di accuratezza dell'ADEMWG ($\pm 10-50$ m).

I *residual*, calcolati per sottrazione delle quote da un DTM dell'IGM della stessa area di studio, il cui valor medio è risultato pari a soli -11 m circa, presentano un distinto *pattern* spaziale risultando caratterizzati da una marcata variabilità. Infatti le tre regioni individuate all'interno dell'ASTER DEM e distinte per fasce altimetriche in costiera, pedemontana e montana, hanno evidenziato differenti valori medi dei *residual*: le differenze di quota maggiori sono state riscontrate nella *regione* COST (14,2 m), mentre quelle minori risultano appartenere alla *regione* MONT (quote superiori agli 800 m), dove l'errore medio è di soli 1,8 m, la quale risulta, così, la sub-area maggiormente accurata. In definitiva, l'accuratezza delle quote dell'ASTER DEM in esame non è risultata essere un parametro costante, bensì dipendente dall'altimetria e, quindi, relativo alla zona considerata.

Le analisi svolte hanno dimostrato che, oltre a dipendere dall'altimetria, l'errore risulta influenzato anche dalle caratteristiche topografiche dell'area di studio (pendenze, esposizione dei versanti, aree drenanti). Infatti gli errori maggiori, sono stati riscontrati sui pochi pendii subverticali presenti (inclinazione superiore ai 70°) ed esposti a ovest-nord-ovest (esposizione compresa tra i 270° e i 320°). Inoltre, le zone di pendio e di spartiacque hanno mostrato la variabilità maggiore dei *residual*, mentre nei canali e nelle aste fluviali gli errori risultano più contenuti.

Per quanto riguarda i parametri geomorfologici derivati dall'ASTER DEM, il confronto per sottrazione con gli analoghi parametri derivanti dal DTM dell'IGM ha evidenziato, nel caso delle pendenze, una differenza media di soli 0,24° e nessuna distribuzione spaziale preferenziale. Nel caso dell'esposizione dei versanti, l'errore medio è di soli 6,84° ma varia a seconda della *regione* considerata: ancora una volta le differenze maggiori riguardano la *regione* COST (16,43°), mentre la *regione* MONT risulta la più accurata con uno scarto di appena 0,42°. Questi risultati dimostrano che, nonostante le differenze di quota esistenti

tra il DTM e l'ASTER DEM, anche a volte rilevanti, l'andamento topografico generale reale dell'area viene preservato, come dimostrato anche dai due profili realizzati per entrambi i *dataset* lungo le stesse sezioni.

Infine il confronto visivo, per sovrapposizione, tra i reticoli idrografici estratti automaticamente dall'ASTER DEM e dal DTM rivela una precisa congruenza tra gli stessi nella *regione* MONT e una buona corrispondenza nella *regione* PDMONT. Scarti, anche considerevoli, sono invece presenti nella *regione* COST.

In definitiva l'ASTER DEM è risultato, sotto il profilo degli errori sulle quote e sui prodotti derivati, maggiormente accurato ed affidabile nelle aree montuose, al di sopra degli 800 m di altitudine, mentre nelle aree costiere, o comunque in aree al di sotto dei 300 m, presenta una minore attendibilità. Si rimarca comunque che non è stata effettuata nessuna operazione di *editing* posteriore alla realizzazione dell'ASTER DEM che potrebbe sicuramente migliorarne la qualità.

In conclusione, sebbene la scala e l'accuratezza degli ASTER DEM limitino il livello del dettaglio delle analisi morfometriche per i quali risultano idonei, e relegano il loro impiego in ambito geomorfologico all'interpretazione di meso- e macro forme ed, in ambito topografico, li rendano utili per cartografare a scale di 1:50.000 e 1:100.000 con errori ritenuti accettabili, tuttavia gli ASTER DEM si propongono ugualmente come una interessante fonte di dati topografici per altri tre motivi fondamentali:

- 1 - la facilità nel reperire e nell'ottenere, in tempi anche molto ristretti, dati ASTER per la maggior parte della superficie del pianeta;
- 2 - la relativa facilità di processamento dei dati e la possibilità di utilizzare immagini di diversi periodi;
- 3 - i costi molto contenuti dei dati ASTER (dal 10 Agosto 2005 la tariffa applicata varia tra 80 e 91 U.S. \$ per immagine) li rendono accessibili e competitivi rispetto agli altri *dataset* satellitari e agli stessi DTM prodotti dall'IGM.

BIBLIOGRAFIA

- CAPOLONGO D. (1999) - *GIS techniques for estimating earthquake-triggered landslide hazards*. Tesi di Dottorato
- DESMET P.J.J. (1997) - *Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs*. Earth Surface Processes Landforms, 22: 563-580.
- FALORNI G., TELES V., VIVONI E.R., BRAS R.L. & AMARANTUNGA K.S. (2005) - *Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission*. J. Geophys.

- Res., **110**: F02005, doi: 10.1029/2003JF000113.
- HIRANO A., WELCH R. & LANG H. (2003) - *Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy assessment*. J. Photogrammetry Remote Sensing, **57**: 356-370.
- HOLMES K.W., CHADWICK O.A. & KYRIAKIDIS P.C. (2000) - *Error in USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling*. J. Hydrology, **233**:154-173.
- KAMP U., BOLCH T. & OLSENHOLLER J. (2003) - *Dem generation from ASTER satellite data for geomorphometric analysis of Cerro Sillajhuay, Chile Bolivia*. Proc. ASPRS 2003 Annual Conference: pp. 9.
- PIKE R.J. (1995) - *Geomorphometry-progress, practice, and prospect*. Z. Geomorph., Suppl.-Bd., **101**: 221-238.
- STEVENS N.F., GARBEIL H. & MOUGINIS-MARK P.J. (2004) - *NASA EOS Terra ASTER: Volcanic topographic mapping and capability*. Remote Sensing of Environment, **90**: 405-414.
- WISE S. (2000) - *Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours*. Hydrological Processes, **14**: 1909-1929.