

# LIMITI E POTENZIALITA' DI MODELLI DI ELEVAZIONE OPEN SOURCE

## LIMITS AND POTENTIALITIES OF OPEN SOURCE ELEVATION MODELS

M.A. Musci

Politecnico di Torino, DIATI, C.so Duca degli Abruzzi 24, 10129, Torino, 011-090(5635,7700,7661), mariaangela.musci@polito.it

**PAROLE CHIAVE:** digitali del terreno, GPS, ASTER, SRTM, metodi di interpolazione.

**KEY WORDS:** Digital Elevation Model, GPS, ASTER, SRTM; interpolation method.

### RIASSUNTO

I modelli digitali di elevazione (DEM), o più nello specifico i modelli digitali del terreno (DTM) si configurano come uno strato informativo importantissimo soprattutto nel caso di applicazioni di tipo ingegneristico-ambientale.

Il dato globale, per questo tipo di applicazione rimane sempre quello a cui si anela per controllare fenomeni naturali che non sempre si limitano all'interno di confini amministrativi ben precisi. Abbiamo attualmente a disposizione, grazie alla legislazione sugli *open data* (direttiva 2013/37/EU), una serie di modelli di elevazione facilmente reperibili e utilizzabili con diverse tipologie di licenza e diversi gradi di copertura. Lo scopo del seguente lavoro è valutare la qualità dei DEM open source per identificarne limiti e potenzialità. Per far ciò sono state condotte delle analisi su due livelli differenti. Una volta selezionati tre DEM open source (ASTER, SRTM, DEM ISPRA) in primo luogo sono stati confrontati con un DEM di riferimento (DTM regione Piemonte). Quindi è stata fatta un confronto puntuale lungo un percorso, prendendo come riferimento dei punti GPS. Le analisi sui profili altimetrici e i confronti con il DEM di riferimento ci dimostrano l'entità degli errori riscontrabili sui diversi DEM, mettono in luce le differenze tra qualità dichiarata e qualità effettiva in determinate zone e ci consentono d'altra parte di mettere in luce le potenzialità di un dato fornito per un territorio che va al di là l'ambito strettamente regionale.

### ABSTRACT

Digital Elevation Models (DEMs), or more specifically the Digital Terrain Models (DTMs), form a very important information layer especially in the case of engineering-environmental applications.

The overall figure for this type of application is always the one that is used to control natural phenomena that are not always limited to well-defined administrative boundaries. We have at our disposal, thanks to the Open Data Act (Directive 2013/37 / EU), a series of elevation models easily available and usable with different licensing types and different coverage degrees. The purpose of the following work is to evaluate the quality of open source DEMs to identify its limits and potentialities. To do this, two different levels of analysis are conducted. On one hand, three DEMs (ASTER, SRTM, DEM ISPRA) were selected and compared with a DEM reference (DTM region Piedmont). On the other hand, a thorough analysis was made along a route, taking as reference GPS points. Altitude profile analysis and the comparison with the reference DEM show the size of the errors found on the various DEMs, highlighting the differences between declared quality and effective quality in certain areas, and allow to assess the potential of a given data for a territory which goes beyond the strictly regional scope.

## 1. INTRODUZIONE

I modelli digitali di elevazione (DEM) si configurano come uno strato informativo fondamentale per lo studio di fenomeni spazialmente distribuiti. Esempi di tali fenomeni possono ritrovarsi nelle analisi di sviluppo degli incendi piuttosto che di qualità dell'aria. Le potenzialità dei DEM risiedono non solo nella modalità di visualizzazione della morfologia del terreno, ma anche e soprattutto nella tipologia di informazioni che è possibile estrarne. Ci si riferisce, ad esempio, alle mappe di, esposizione e pendenza.

Per definizione un modello altimetrico è un insieme di dati che consente di valutare la quota di punti sul terreno con una data precisione (Brovelli M.A., Cina A., Crespi M., Lingua A.M., Manzano A., 2011).

Poiché la distinzione tra DTM (Modello digitale del terreno), DSM (Modello digitale della Superficie) e DEM non è del tutto univoca, si intenderà per DEM nel seguito, la generica famiglia di modelli di elevazione (Dabove, P. et al, 2015) (Figura 1).

Dal 2009, con il DEM ASTER, prodotto dalla NASA (National Aeronautics and Space Administration), sono disponibili DEM con copertura globale. Accanto a questi, con l'entrata in vigore della 2003/98/CE, tra i contenuti rilasciati in licenza *Creative*

*Commons* dalle pubbliche amministrazioni, troviamo anche i DEM *open source* generati per porzioni di limitate al territorio nazionale o regionale.

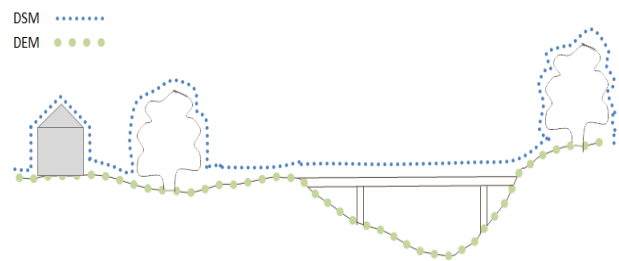


Figura 1. Differenze tra DEM, DTM e DSM

Il vantaggio di tali DEM risiede nella possibilità di consultare e usufruire liberamente di un dato che di per sé risulta più accurato e preciso. Il loro limite invece è riscontrabile nelle zone di confine tra due regioni amministrative differenti dove non sono garantiti gli stessi livelli di accuratezza, precisione, sistemi di riferimento.

Ma cosa si intende per *open data* e licenza *Creative Commons*? In generale quando si parla di *open data*, si intende la classe di dati accessibili, utilizzabili, modificabili e condivisibili da chiunque (<http://www.opendefinition.org/okd/italiano/>). Nonostante ciò, risulta necessario tener conto delle differenti modalità con cui questi vengono resi disponibili. Attualmente, il quadro delle licenze e modalità di distribuzione è piuttosto ampio e in continua evoluzione; tra le licenze *Creative Commons* si hanno:

- licenze senza vincoli (dominio pubblico),
- licenze che richiedono attribuzione,
- licenze che richiedono attribuzione e la stessa modalità di condivisione (share alike).

In generale i DEM vengono rilasciati con licenze che richiedono l'attribuzione, dopo il riuso.

Per quanto riguarda la modalità di distribuzione, i dati vengono rilasciati mediante servizi di WEB OGC (Open Geospatial Consortium, <http://www.opengeospatial.org>), che possono consentire la sola consultazione remota oppure il trasferimento con la memorizzazione in locale. Nell'ambito dei servizi OGC, si distinguono: i servizi WCS (Web Coverage Service) che consentono l'accesso alle immagini raster, servizi WMS (Web Map Service) che veicolano immagini raster georeferenziate con il contenuto informativo associato (formato Geotiff, piuttosto che Ascii, .hgt, .bin, .flt) e il servizio WFS (Web Feature Service) che veicola contenuti vettoriali GML, piuttosto che shapefile. Il servizio generalmente utilizzato per la distribuzione di modelli digitali di elevazione è di tipo WMS perché è quello che consente di veicolare immagini con l'informazione del valore associato al pixel: nel nostro caso la quota.

Il rilevamento dell'altezza del terreno per la costruzione dei modelli può avvenire attraverso rilievo diretto GPS/GNSS, tecniche LiDAR (Light Detection And Ranging), tecniche fotogrammetriche, tecniche SAR (Synthetic Aperture Radar) e telerilevamento da satellite. Il metodo di produzione e quindi le accuratezze e la precisione delle osservazioni saranno strettamente legate al grado di copertura, allo scopo e alle tempistiche di produzione.

In generale si può dire che rilevamenti GPS e tecniche LiDAR vengono utilizzati per la produzione di DEM ad alta precisione e accuratezza per porzioni di territorio a scala al più regionale con tempistiche di produzione più dilatate nel tempo (es. DTM Regione Piemonte). Le tecniche di fotogrammetria aerea sono utilizzate per la produzione di DEM di livello da 0 a 3 (M. Brovelli et al, 2011), con tempistiche di produzione più brevi rispetto alle tecniche LiDAR. Si utilizzano tecniche SAR e telerilevamento da satellite per la realizzazione di DEM a copertura più ampia (anche globale). Le tempistiche di acquisizione, scandite da regolare periodicità in questo caso permettono un frequente aggiornamento. Si pensi per esempio al dato ASTER o SRTM.

Lo scopo del presente lavoro è quello di valutare la qualità di DEM *open source*, partendo da un rilievo GPS rigoroso e dal confronto con il DEM regione Piemonte preso come riferimento, per capirne limiti e eventuali sviluppi futuri. In particolare, in questo caso sono stati analizzati i DEM rilasciati con licenza con vincoli di attribuzione mediante servizi WCS (Tabella 1, §2), prodotti con diverse modalità e a diverse risoluzioni, con diverse precisioni e accuratezze.

## 2. I MODELLI DIGITALI DEL TERRENO ANALIZZATI

Per le analisi oggetto di studio, sono stati scelti quattro modelli di DEM differenti sintetizzati in Tabella 1.

| Dato             | Livello   | Aggiornam. | Dim. Cella |
|------------------|-----------|------------|------------|
| ASTER            | Globale   | 2011       | 30m        |
| SRTM             | Globale   | 2017       | 30m        |
| ISPRA            | Nazionale | 2012       | 20 m       |
| Regione Piemonte | Regionale | 2011-2013  | 25 m       |

Tabella 1. DEM analizzati.

Il sensore ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) è montato sul satellite TERRA dal 1999 e fornisce immagini multispettrali (in totale 22.600 raster, ciascuno con ampiezza pari a  $1^\circ \times 1^\circ$  in latitudine e longitudine) ad alta risoluzione, a scala globale, ricoprendo una superficie compresa tra  $83^\circ\text{N}$  e  $83^\circ\text{S}$  (Figura 2). Questo progetto è nato dalla collaborazione tra la NASA e il Ministero giapponese dell'Economia, dei Trasporti e dell'Industria (METI, Ministry of Economy, Trade and Industry) e ha condotto alla realizzazione di un modello del terreno con una griglia di elevazione di 1 arc-secondo (30m) con geode di riferimento WGS84/ EGM96. Il GDEM ASTER è fornito in Geotiff con sistema di coordinate geografiche WGS84 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

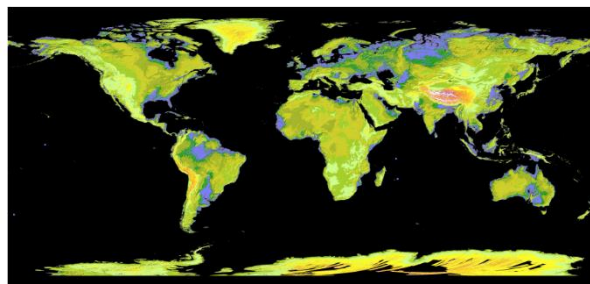


Figura 2. Copertura del modello ASTER (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Il modello SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), acquisito con la tecnica dell'interferometria radar è disponibile in Geotiff in WGS84 con una risoluzione spaziale variabile in base alle zone tra 30m e 90m (Figura 3). La missione per le acquisizioni iniziata nel 2000 è stata realizzata mediante collaborazione tra la NASA (National Aeronautics and Space Administration), il Dipartimento della Difesa americano (DoD), la National Imaging and Mapping Agency (NIMA), l'agenzia Spaziale tedesca (DLR) e l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI). Per le acquisizioni è stata utilizzata l'interferometria a singolo passaggio da satellite, ovvero sono state acquisite contemporaneamente due immagini radar, una da un'antenna alloggiata nello shuttle e l'altra da una seconda antenna posta all'estremità di un traliccio lungo 60m..

L'accuratezza dichiarata in ogni caso è pari a 20m in planimetria e 16m in altimetria (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Il DTM ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) deriva dall'interpolazione dei dati orografici provenienti dalla cartografia dell'Istituto Geografico Militare. Il dato prevede una copertura ristretta al solo territorio italiano ed è prodotto con un passo di 20m e distribuito in formato Geotiff in WGS84 UTM fuso 32 (<http://www.sinanet.isprambiente.it/>). La precisione dichiarata in questo caso è pari a 10m.

Il DEM Regione Piemonte è derivato dal DTM Lidar (Volo ICE 2009-2011) acquisito per tutto il territorio regionale con uno standard di livello 4, quindi con tolleranza in quota di 0.60m in campo aperto e 1.2m con copertura arborea (Brovelli et al., 2009). Il DEM, generalizzato partendo da una maglia di dimensioni 5x5m, è disponibile in Geotiff in WGS84 UTM fuso

32, con una risoluzione spaziale di 25m (<http://www.geoportale.piemonte.it>).

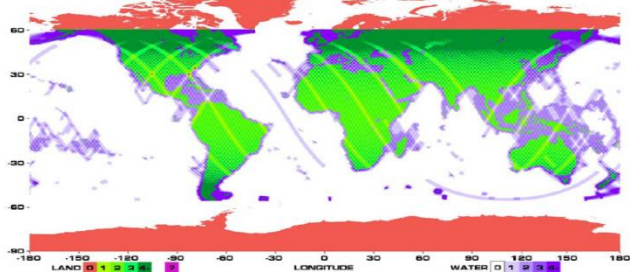


Figura 3. Copertura del modello SRTM (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

### 3. IL CASO STUDIO

L'area presa in esame per il confronto tra modelli digitali di elevazione di Regione Piemonte con ISPRa e ASTER risulta comprensiva dell'intero Piemonte. Diversamente per il modello SRTM, è stata considerata un'area limitata (figura 4), in quanto il modello a 30m ha una copertura ristretta a specifiche aree. Il DEM SRTM si estende per una zona pari a 400 km<sup>2</sup>, e si colloca nel quadrangolo compreso tra circa tra 6° 57' 39" E e i 8° 06' 36" E gradi di longitudine e 45° 57' 39" N e 44° 59' 13" gradi di latitudine.



Figura 4 Estensione DEM SRTM considerato.

Per quanto invece riguarda le tracce GPS, si è scelto di analizzare un'area nelle valli di Lanzo (Figura 5). Sono state acquisite due tracce. La traccia 1 (Figura 5) con coordinata iniziale di 45° 13' 55" N gradi di latitudine, 7° 12' 30" gradi di longitudine e coordinata finale di 45° 13' 55" N gradi di latitudine, 7° 12' 30" E di longitudine e una lunghezza complessiva di 7 km circa. Mentre la traccia 2 (Figura 5) con coordinata iniziale di 45° 14' 00.23" N di latitudine, 7° 25' 15" E di longitudine e coordinata finale di 45° 15' 07.5" N di latitudine, 7° 28' 01.6" E di longitudine e una lunghezza complessiva di 8,5 km circa. La scelta dell'area di acquisizioni è dettata dalla volontà di valutare un territorio prevalentemente montuoso, dove sono più accentuate le differenze di quota.

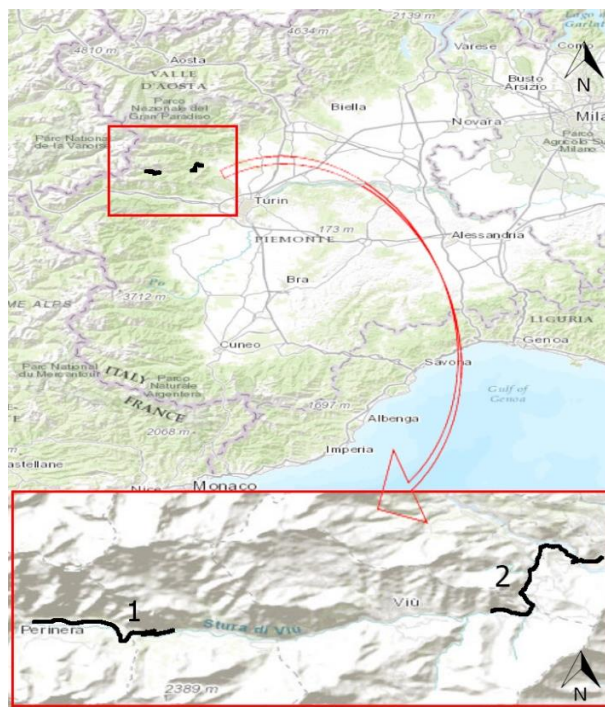


Figura 5. Ubicazione acquisizioni GPS/GNSS. Traccia 1 sulla destra e Traccia 2 sulla sinistra.

### 4. METODOLOGIA

#### 4.1 Rilievo GNSS

Il rilievo GNSS è stato effettuato con una auto dotata (Figura 7) di due Action Camera Garmin (16Mp) e un Ekinox2-D: Dual GPS INS le cui caratteristiche sono evidenziate in Figura 6 (<https://www.sbg-systems.com/products/ekinox-d-dual-antenna-gps-inertial-system>). Le due tracce GPS (Figura 5) sono state acquisite con una frequenza di 100Hz ed post-elaborate con Inertial Explorer.

- 0.02° Roll, Pitch over 360°
- 0.05° True Heading
- 2 cm RTK GNSS Position @ 200 Hz
- 5 cm Real-time Heave
- 2.5 cm Delayed Heave
- 48h Internal Data Logger
- IP68 Enclosure, Compliant MIL-STD



Figura 6. Sistema Ekinox2-D utilizzato per il rilevamento GPS/GNSS (<https://www.sbg-systems.com/>)

#### 4.2 Preparazione dei dati

Come primo passo, i DEM dell'area studio sono stati riportati tutti nello stesso sistema di riferimento (-WGS84) con CARTLAB. Per quanto invece riguarda la risoluzione, per rendere possibile il confronto, è stata mantenuta la griglia originale 30mx30m per quanto riguarda l'ASTER GDEM. Negli altri casi è stata effettuata un'operazione di sottocampionamento (con il comando *resample* di ArcMap 10.5) impostando la dimensione della griglia pari al dato ASTER, quindi 30m x30m. Com'è noto è possibile effettuare questo genere di operazione in ArcMap, con diverse modalità: *nearest neighbour*, *Bilinear Interpolation* o *Cubic Convolution*. Nel nostro caso si è scelto di utilizzare i metodi di ricampionamento bilineare e cubico, come

raccomandato nel caso di modelli di elevazione nelle linee guida CISIS (Brovelli M.A., 2011). Il metodo *nearest neighbour*, benchè più veloce risulta più efficace se utilizzato su dati organizzati per categorie, ad esempio nel caso di mappe di copertura del suolo (Esri support, 2016).



Figura 7. Sistema Ekinox2-D utilizzato per il rilevamento GPS/GNSS (<https://www.sbg-systems.com/>)

#### 4.3 La qualità dei modelli digitali del terreno

La qualità dei modelli digitali del terreno viene spesso valutata per confronto con punti di controllo o altri DTM con accuratze maggiori (Wise, 2000).

In genere si procede confrontando il modello con le quote dei capisaldi delle reti altimetriche di inquadramento geodetico, con precisione dell'ordine del millimetro, o con le quote di punti GPS misurati mediante rilievo RTK fatto ad hoc.

Nelle differenze tra le coordinate dei DEM da validare e quelle dei punti di controllo sono presenti in genere dei sistematismi che vengono rimossi in termini di differenza altimetrica media e di differenze planimetriche medie. Sui residui si valuta l'RMSE (Root Mean Square Error) o indici dedotti dall'errore quadratico medio (Brovelli et al., 2009, ISO/TC 211: TS 19138 - Geographic information - Data quality measures - N 2029 del 5 giugno 2006). Per il calcolo dell'RMSE, si utilizza la seguente formula:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{m,i} - Z_{r,i})^2}{n}}$$

dove:

$n$  è il numero delle osservazioni di riferimento;

$Z_{r,i}$  sono le osservazioni di riferimento ottenute in modo molto più accurato rispetto al dato da validare;

$Z_{m,i}$  sono le quote da validare.

Al fine di valutare dunque, la qualità dei nostri dati sono state effettuate due tipologie di analisi: una a grande scala considerando i DEM a nostra disposizione sull'intero Piemonte e una puntuale sui singoli profili.

#### 4.4 Confronto tra i modelli digitali di elevazione

I DEM sono stati confrontati mediante una differenza tra raster realizzata con lo strumento di ArcMap 10.5 - *Math Minus*, prendendo come riferimento il DTM Regione Piemonte.

È stata quindi analizzata in questo caso la deviazione standard per quantificare quanto i dati siano prossimi al valore medio e individuare l'intervallo entro il quale si distribuiscono le quote.

#### 4.5 Confronto tra i DEM e le tracce GPS

Si è passati così alla valutazione delle differenze tra le altezze valutate per un sottoinsieme dei punti rilevati con il GPS e le altezze ricavate dai DEM.

Il confronto ha richiesto di trasformare preventivamente le quote ellissoidiche ottenute con il GPS in quote ortometriche, come quelle dei DEM da validare.

Per far ciò è stato utilizzato il software ConveRgo, a partire dai grigliati disponibili per la Regione Piemonte.

Poiché i profili GPS sono stati acquisiti a con rate di 100Hz (3) è stata necessaria un'operazione di "resampling" a 10 Hz (corrispondente a circa un dato ogni 30 m) per fare in modo che la numerosità di punti fosse compatibile con la griglia del DEM. Il passo è stato scelto considerando la dimensione della cella con cui il dato è stato poi confrontato.

Diversamente da quanto fatto con i raster, la riduzione dei punti è stata effettuata mediante una semplicissima routine *Matlab* in grado di selezionare un punto ogni 10.

Considerando due tracce GPS contenenti le quote, è stato utilizzato il tool di *ArcMap 10.5 Add Surface information* per calcolare l'altezza sui diversi DEM ricorrendo a una interpolazione bilineare, seguendo le linee guida riportate in letteratura (Brovelli M.A. et al 2011)

### 5. RISULTATI E DISCUSSIONI

#### 5.1 Confronto da Modelli Digitali di Elevazione

Come spiegato nel §3.3, prendendo come riferimento il DEM Regione Piemonte, sono stati ricavati i valori di massimo, minimo, media e deviazione standard, riassunti in tabella 2, per ciascuna differenza tra DEM in formato raster (.Geotiff).

Tale operazione è stata effettuata per rilevare eventuali sistematismi e valutare la precisione altimetrica.

Le statistiche sono state ricavate in modo automatico mediante il software *ArcMap 10.5*.

| Dato                   | Metodo ric. | Min (m) | Max (m) | Media (m) | St.dv (m) |
|------------------------|-------------|---------|---------|-----------|-----------|
| Regione Piemonte-Aster | bilineare   | -792,82 | 2154,12 | -3,44     | 14,74     |
| Regione Piemonte-Aster | cubico      | -794,24 | 2156,39 | -3,40     | 15,95     |
| Regione Piemonte-SRTM  | bilineare   | -269,08 | 176,23  | -1,84     | 7,87      |
| Regione Piemonte-SRTM  | cubico      | -269,89 | 178,67  | -1,81     | 8,284     |
| Regione Piemonte-ISPRA | bilineare   | -531,85 | 549,85  | -0,81     | 20,12     |
| Regione Piemonte-ISPRA | cubico      | -540,34 | 555,34  | -0,82     | 20,42     |

Tabella 2. Tabella riassuntiva delle statistiche sulle differenze tra DEM.

Dalla tabella 2 si nota che le differenze minime e massime sono di ordini di grandezza molto maggiori rispetto all'intervallo di variabilità stimato, evidenziando la presenza di outlier. È stato necessario quindi valutare quali fossero le zone con le differenze maggiori.

Osservando le mappe di differenza ottenute si può notare che c'è una correlazione molto evidente tra entità delle differenze e morfologia del territorio (Figura 8). Con il cambiamento repentino di quota, aumenta anche la differenza tra le quote dei due DTM (Borgogno E. M. et al 2004) e i valori massimi sono concentrati per la maggior parte nella zona montuosa.

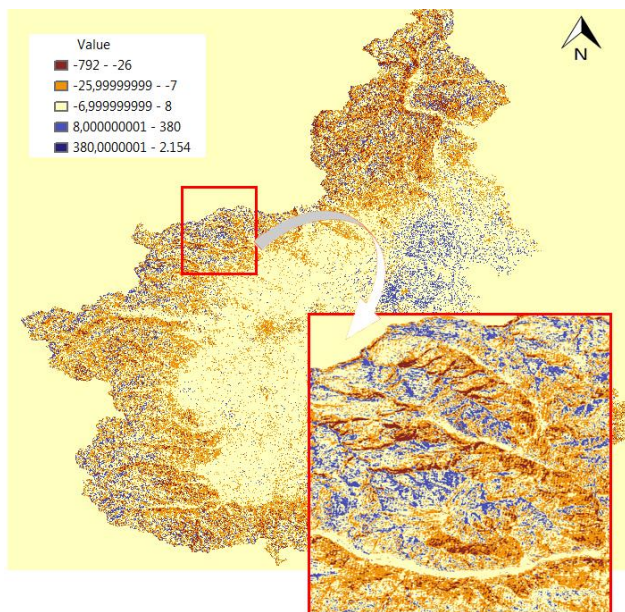


Figura 8. Raster delle differenze tra il DTM Regione Piemonte e il DEM ASTER

## 5.2 Confronto tra DEM e le tracce GPS

Dal calcolo delle Z, come descritto in §3.3, è stato possibile costruire i profili del terreno lungo le coordinate (X, Y) rilevate con il GPS. Al fine di valutare le differenze è stata calcolata la progressiva km. Questo perché ciò ci permette di fare un confronto punto a punto tra i valori di elevazione estratti dai DEM e le quote rilevate con il GPS:

Per la traccia 1 quindi i profili sono riportati nel grafico in figura 4. In base al *range* dei valori del GPS, il grafico è stato limitato ai valori di distanza compresi tra 0 e 7 km e i valori di altezza ortometrica tra 1000 e 1290 m.

Da come risulta visibile dal grafico (Figura 9) il profilo che si discosta meno dalle quote GPS è quello ottenuto a partire dal DEM della Regione Piemonte. I picchi che si notano sui profili, mi riferisco al profilo SRTM (in blu) o al dato ISPRA, potrebbero essere dovuti alla rumorosità del dato piuttosto che alla modalità di creazione del DTM stesso.

Dal grafico (Figura 10) emerge subito che benché nel caso del dato ISPRA si trattasse di un DEM di livello 4, le differenze rispetto alle coordinate GPS sono dell'ordine di 20 m, quindi ben lontane dai livelli di accuratezza e precisioni auspicabili. Diversamente le differenze tra DTM regione Piemonte sono dell'ordine di 1m.

Utilizzando gli stessi principi e metodi è stata analizzata la traccia 2. Anche in questo caso il dato Aster (profilo in verde) è quello che si discosta di più dal dato GPS (profilo in azzurro) e si rilevano in zone di repentino cambio di pendenza picchi con differenze molto alte (Figura 11).

Per quanto riguarda invece l'andamento delle differenze, come si può notare dal grafico (Figura 12), il dato ISPRA registra il maggior numero di picchi nelle differenze, molto probabilmente dovuti o alla mancanza di informazioni puntuali, o alle modalità di produzione del dato, nonché alla morfologia del terreno. Si

registrano picchi meno acuti, ma comunque non trascurabili anche nel caso del DEM ASTER (Figura 13). In Figura 10 si riportano le differenze tra i profili estratti dai DTM e le quote ottenute dal GPS (Figura 11).

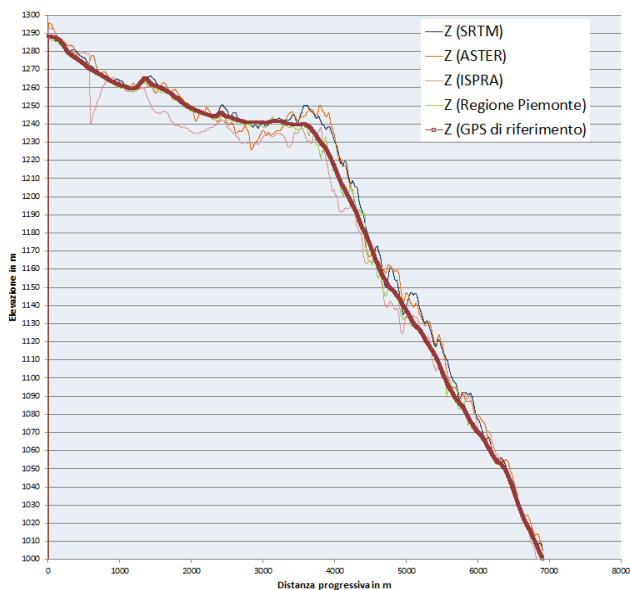


Figura 9. Confronto tra i profili ricavati dai DEM e quello GPS per la traccia 1.

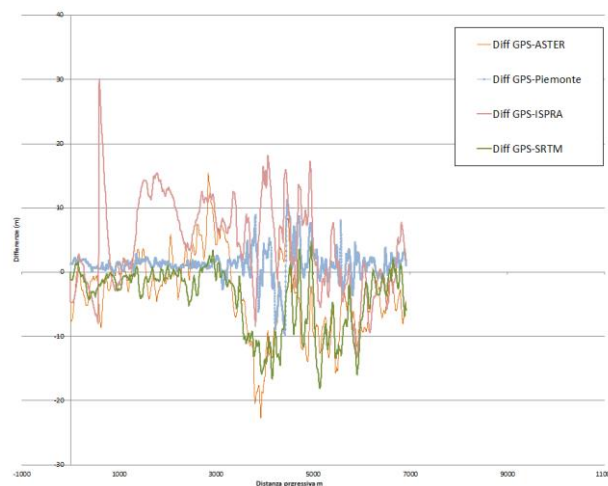


Figura 10. Andamento delle differenze (Traccia 2)

## 6. CONCLUSIONI

L'impossibilità di poter contare su rilievi puntuali per ottenere modelli di elevazione *ad hoc* liberamente utilizzabili nelle più disparate applicazioni di tipo ambientale e ingegneristico, viene in qualche modo compensata grazie alla presenza di DEM messi a disposizione sul Web sotto forma di *open data*.

L'utilizzo richiede però la conoscenza della qualità del dato da utilizzare.

Ecco che si è voluto valutare la qualità dei DEM open source disponibili confrontandoli sia con un DEM di riferimento di accuratezza nominale maggiore che con profili altimetrici ricavati tramite GPS con precisioni centimetriche.

Dalle analisi effettuate risulta che tutti i DEM (§4.1 e ss.) rispettano le precisioni nominali, con differenze maggiori rispetto ai valori di controllo nelle zone con cambi di pendenza repentini e sui bordi. Ciò nonostante è innegabile il valore dei

DEM open source per la possibilità di usufruire del dato in qualunque momento nella sua ultima versione con coperture globali.

E' altresì vero che laddove siano necessarie precisioni elevate, tali DEM non siano sufficienti e che occorra ricorrere a DEM a copertura limitata, come il DEM Regione Piemonte. D'altro canto nelle analisi di taluni fenomeni non confinabili all'interno di specifici confini amministrativi, la continuità di dati come il DEM diventa essenziale.

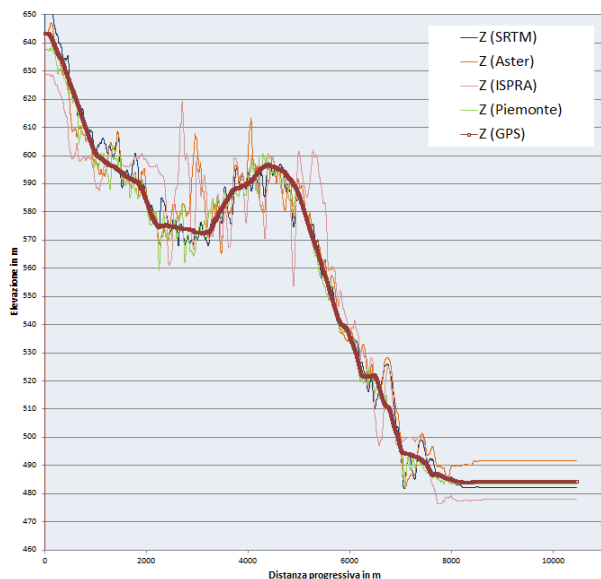


Figura 11. Traccia 2. Confronto tra i profili ricavati dai DEM e quello GPS (Traccia 2).

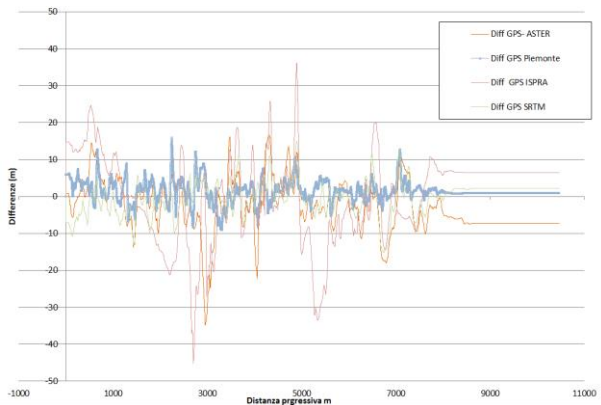


Figura 12. Traccia 2. Andamento delle differenze (Traccia 2).

Sono state fatte al tal proposito esperienze di integrazione e armonizzazione di dati provenienti da più fonti per garantire una copertura di zone di frontiera con maggiori precisioni, ma purtroppo su aree limitate e con tempi lunghissimi.

Le prospettive future si configurano nella possibilità di sviluppare tecniche di armonizzazione dei dati che permettano di colmare esattamente i vuoti di informazione mantenendo delle precisioni ragionevoli.

### RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il Prof. Bassani per la collaborazione per i rilievi GPS/GNSS.

### BIBLIOGRAFIA

#### Riferimenti da giornali o atti di convegno

Belotti P., Biagi L., et al. (2013), Il Progetto HELI-DEM, Introduzione al Progetto HELI-DEM (Helvetia-Italy Digital Elevation Model), Numero Speciale Bollettino SIFET 2013, pp.15-23.

Brovelli M. A., Caldera S., and Liu X.(2009), 3D comparison of DTMs without the use of homologous points, in Proceedings of 6th International Symposium on Digital Earth, (Beijing,China).

Capolongo D., Marangi M, Albanese F, Penneta L (2008). Modelli digitali del terreno tratti da immagini satellitari: analisi e validazione dei DEM Aster per applicazioni geomorfologiche. MEMORIE DESCRITTIVE DELLA CARTA GEOLOGICA D'ITALIA, vol. 78; p. 31-48, ISSN: 0536-0242

Carrara, A., Bitelli, G. e Carlà, R. (1997), Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines, Int. J. Geographical Information Science, vol.11, no.5,451-473.

Dabove, P.; Manzano, A.M., Taglioretti, C. (2015) L'accuratezza dei DEM per analisi idrologiche. In: GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA vol. LII n. 1, pp. 15-22. - ISSN 1121-9041

Dermanis A., Biagi L. (2002), Il telerilevamento, informazione territoriale mediante immagini da satellite, 280 pp. e CD con esempi numerici, CEA Editrice, Milano.

Li Z., Zhu Q., Gold C. (2005), Digital terrain modeling: principles and methodology, CRC, Boca Raton.

Kidner D.B., Dorey M., Smith D. (1999), What's the point? Interpolation and extrapolation with a regular grid DEM. Proceedings of the 4th International Conference on GeoComputation Mary Washington College Fredericksburg, Virginia, USA, 25 - 28 July 1999.

Kraus K. (1998), Fotogrammetria, Vol.1 Teoria e applicazioni, traduzione e ampliamenti di S.Dequal, Libreria universitaria Levrotto e Bella, Torino.

Rees W.G. (2000), The accuracy of digital elevation models interpolated to higher resolutions. International Journal of Remote Sensing, vol. 21, no.1, pp. 7-20

#### Altri riferimenti stampati

Borgogno Mondino E.; F., Tonolo F.G., P. Boccardo, Bellone T., (2004). DTMs Generation from Satellite Stereo Images: Accuracy Tests in Mountain Region. In: Spie 2004, Gran Canaria (Spain), 2004. pp. 341-350.

Brovelli M.A., Cina A., Crespi M. , Lingua A.M., Manzano A., (2011). Ortoimmagini e modelli altimetrici a grande scala. Linee Guida. CISIS.- [www.centrointerregionalegis.it/ortofoto/cisis\\_ortofoto\\_dtm\\_grande%20scala\\_finale\\_2.pdf](http://www.centrointerregionalegis.it/ortofoto/cisis_ortofoto_dtm_grande%20scala_finale_2.pdf).

#### Riferimenti da siti web

ESRI, Support, <http://support.esri.com/technical-article/000005606> (15/01/2017).

Geoportale Regione Piemonte, Catalogo, DTM25 <http://www.geoportale.piemonte.it/cms/> (27/02/2017)

ISO/TC 211 - Geographic information/Geomatics.  
<http://www.isotc211.org/> (06 Nov. 2014).

Open Data Definition, <http://www.opendefinition.org>,  
(15/01/2017).

Open Geospatial Consortium, <http://www.opengeospatial.org>  
(15/01/2017)

SBG Systems, Ekinox2-D: Dual GPS INS, <https://www.sbg-systems.com/products/ekinox-d-dual-antenna-gps-inertial-system>. (25/03/2017)

SINAnet Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale, DEM20, <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/>  
(02/02/2017)

USGS (U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey), Earth Explorer, <https://earthexplorer.usgs.gov/> (27/02/2017)