

STEFANO PIGNOTTI (*), ALESSANDRO CECILI (**), ALESSANDRO CINNIRELLA (**),
CARLO CIPOLLONI (**), MASSIMILIANO FAZZINI (**)

MODELLI DIGITALI DEL TERRENO (DTM) AD ALTA RISOLUZIONE PER IL MONITORAGGIO DEI GHIACCIAI ALPINI

ABSTRACT: PIGNOTTI S., CECILI A., CINNIRELLA A., CIPOLLONI C. & FAZZINI M., *Digital Terrain Models of a high resolution for monitoring alpine glaciers*. (IT ISSN 1724-4757, 2005).

The aim of the research is the 3D reconstruction of a glacier surface through the use of satellite stereoscopic images and Geographical Information Systems (GIS). The project's double goal is to improve Digital Terrain Model (DTM) extraction techniques in morphologically highly-complex areas and to obtain a high resolution DTM for studying, monitoring, and quantifying the glacial resource.

The extraction of the high-resolution glacial surface DTM faces different challenges due to the extreme physical variability of the surface. Glacier ice is a continuously moving deformable material that can locally generate morphologically complex structures such as seracs and crevasses. These features show a seasonal variability linked to meteorological conditions. An additional reason of complexity is the presence of debris (surface moraines) and snow cover: they can apparently alter the spatial shape of the glacier as well as its own elevation. The aim of the research is to identify a fast, reproducible, and reliable method to support the traditional glacier survey and monitoring techniques. From the technological point of view, we also want to verify the chances offered by new remote sensing acquisition systems and relevant elaboration software. This first part of the research has been of value in proving the reliability of the aerial and satellite images plane/elevation data elaboration system, in checking the acquisition difficulties and costs, and in testing the utilization limits of the remote sensed data.

KEY WORDS: DTM, Glacier, Remote Sensing, GIS, GPS.

RIASSUNTO: PIGNOTTI S., CECILI A., CINNIRELLA A., CIPOLLONI C. & FAZZINI M., *Modelli Digitali del Terreno (DTM) ad alta risoluzione per il monitoraggio dei ghiacciai alpini*. (IT ISSN 1724-4757, 2005).

(*) IMONT - Istituto Nazionale della Montagna, piazza dei Caprettari 70 - 00186 Roma.

(**) UNIROMA TRE - Dipartimento di Scienze Geologiche dell'Università di Roma Tre, largo S. Leonardo Murialdo 1 - 00146 Roma.

Gli Autori ringraziano F. Gemma e i suoi collaboratori (Informatica per il Territorio S.r.l.) per aver messo a disposizione l'immagine EROS A1; il Museo Tridentino di Scienze Naturali per i dati forniti; il Consorzio del Parco Nazionale dello Stelvio per l'ospitalità; C. Cimarelli, G. Giordano e S. Zanardo per il prezioso supporto ai rilievi di campagna. Un sentito ringraziamento anche al Prof. F. Dramis per la revisione critica del testo.

L'obiettivo della ricerca è la ricostruzione tridimensionale della superficie di un ghiacciaio, mediante l'uso di immagini stereoscopiche da satellite ed analisi in ambiente GIS (Sistemi Informativi Geografici). Il duplice scopo che ci si propone è quello di migliorare le tecniche per l'estrazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM) in aree ad elevata complessità morfologica e realizzare un DTM ad alta risoluzione per lo studio, il monitoraggio e la quantificazione della risorsa glaciale.

L'estrazione di DTM ad alta risoluzione della superficie di un ghiacciaio deve affrontare diversi problemi connessi all'estrema variabilità fisica della superficie stessa. Il ghiaccio è un materiale solido deformabile che è soggetto a continuo movimento, che localmente può dar luogo a strutture ad elevata complessità morfologica, quali seracchi e crepacci, che presentano una variabilità stagionale legata alle condizioni meteorologiche. Un ulteriore motivo di complessità è la presenza di possibili coperture detritiche (morene superficiali) e nevose che possono alterare apparentemente non solo la forma spaziale del ghiacciaio, ma anche la sua altezza. La ricerca si prefigge di mettere a punto una metodologia rapida, ripetibile e affidabile da affiancare alle tecniche tradizionalmente usate per i rilievi glaciologici e il monitoraggio delle aree glaciali. Dal punto di vista tecnologico, inoltre, si vogliono verificare le possibilità offerte dai nuovi sistemi di acquisizione da *remote sensing* e i relativi *software* di elaborazione e analisi. In termini pratici, in questa prima fase della ricerca sono state verificate l'affidabilità del sistema di elaborazione del dato planaltimetrico da foto aeree e da satellite, le difficoltà di acquisizione e i relativi costi, i limiti di utilizzo del dato telerilevato. Tali verifiche e analisi sono state eseguite sulla Vedretta de La Mare, nel settore trentino del Parco Nazionale dello Stelvio.

TERMINI CHIAVE: DTM, Ghiacciai, Telerilevamento, GIS, GPS.

INTRODUZIONE

Il telerilevamento è diventato in questi ultimi anni uno strumento scientifico e tecnologico importante, utilizzato per monitorare le superfici del pianeta e per ricerche atmosferiche e oceanografiche, con applicazioni pratiche nella gestione delle risorse naturali e ambientali. Lo sviluppo dei Sistemi Informativi Geografici (GIS), parallelo alle tecniche di telerilevamento, ha fornito inoltre un significativo aiuto all'integrazione dei dati telerilevati con altre informazioni spaziali. Per quanto riguarda lo studio dei ghiacciai l'uso del dato telerilevato (da aereo o satellite), da

affiancare alle tradizionali indagini glaciologiche e ambientali, ha avuto recentemente un notevole impulso (Frezzotti & alii, 1998; Kääb, 2002). In ambito continentale montuoso molti processi naturali, quali le variazioni dell'estensione dei ghiacciai e delle coperture nevose, l'attività termica superficiale, l'evoluzione della linea d'equilibrio (ELA) e l'analisi del rischio idrogeologico sono stati studiati facendo uso di tecniche di telerilevamento. Oltre alle citate applicazioni, le immagini acquisite da piattaforma aerea e satellitari rappresentano sempre più uno strumento efficace per la ricostruzione morfologica della superficie glaciale mediante l'estrazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM), abbinando a queste la georeferenziazione e la validazione dei risultati a terra mediante GPS (Global Positioning System). La ricostruzione periodica del modello tridimensionale della superficie di un ghiacciaio è un elemento essenziale per il monitoraggio delle sue variazioni.

È stata quindi verificata, nel corso del primo anno del progetto *Cryoalp* dell'IMONT, la possibilità di confrontare, in ambiente GIS, diverse sorgenti di dati (storici, cartografici, foto aeree, satellitari e rilievi a terra), a supporto dell'analisi semiquantitativa superficiale, in aree ad elevata complessità morfologica. Tra le possibili aree glaciali è stata individuata la Vedretta de La Mare, nel settore trentino del Parco Nazionale dello Stelvio, come quella più confacente agli scopi, considerando inoltre l'elevato valore naturalistico e ambientale dell'area.

La superficie di un ghiacciaio è un oggetto tridimensionale in continuo movimento e presenta variazioni altimetriche (a piccola e grande scala) sia in relazione al continuo movimento del ghiacciaio sia relativamente ai fenomeni di accumulo e ablazione. Nel corso della ricerca, quando il dato relativo all'elevazione è risultato essere sufficientemente accurato, è stata effettuata l'estrazione dell'informazione planoaltimetrica dalla documentazione raccolta e sono stati realizzati dei DTM. In alternativa, soprattutto per la cartografia storica, si è proceduto a estrarre solo il dato planimetrico, utilizzato per evidenziare le variazioni di superficie e l'evoluzione della fronte glaciale.

Nello studio delle variazioni volumetriche (bilanci di massa) da qualche anno ci si avvale, su ghiacciai d'interesse scientifico o economico, dell'elaborazione di DTM derivati da rilievi aerofotogrammetrici o da rilievi GPS in RTK (*Real Time Kinematics*). La prima metodologia, applicata sul vicino apparato glaciale del Careser (Giada & Zanon, 1991), ha permesso un confronto tra i valori desunti e quelli tradizionali glaciologici del bilancio di massa negli stessi anni di riferimento. I risultati sono stati pienamente soddisfacenti, con una differenza, come altezze d'acqua equivalenti, tra i valori del bilancio netto e i dati ricavati dalla fotogrammetria, di $-0,7$ m su un bilancio complessivo di $-10,8$ m (scostamento di circa il 6%). Questo risultato mette in evidenza l'interesse nella realizzazione di modelli 3D della superficie glaciale, sollevando al contempo la problematica dell'accuratezza del dato originale, che nel caso di rilievi aerofotogrammetrici di dettaglio ha una accuratezza superiore rispetto alle normali foto aeree. Nel caso di rilievi GPS in RTK, testato su diversi apparati glaciali italiani (Lanzi & alii, 2001) ma anche in Himalaya, so-

no state raggiunte precisioni nell'elaborazione dei DTM dell'ordine di pochi centimetri; tuttavia, le difficoltà operative legate alla estensione dei ghiacciai e alla percorribilità della superficie glaciale rendono questo sistema, se pur preciso e affidabile, ancora limitato nel suo utilizzo a situazioni particolari.

STUDI PRECEDENTI NEL CAMPO DELL'ANALISI DI DTM

La realizzazione di modelli digitali del terreno da foto aeree o, comunque, da immagini stereoscopiche è illustrata dai testi di fotogrammetria (Amadesi, 1993; Lillesand & Kiefer, 1998), che descrivono ampiamente anche i principi dell'ottica su cui si basa l'estrazione dell'immagine stereoscopica (immagine tridimensionale per correlazione dei punti omologhi di due immagini).

Nell'ultimo decennio lo sviluppo tecnologico della fotogrammetria digitale ha facilitato la progettazione di numerosi software in grado di elaborare direttamente dallo stereogramma i DTM. Il problema maggiore è rappresentato dall'accuratezza dei modelli elaborati dagli stessi, come evidenziano alcuni autori (Della Rocca & alii, 2002; Lillesand & Kiefer, 1998; Zukowskyj & alii, 2000), e risiede in due tipologie di errori: quelli sistematici, legati all'errore di misurazione dell'oggetto geografico, e quelli non-sistematici, determinati dalla distorsione dell'immagine e dall'algoritmo matematico di elaborazione del modello tridimensionale. Per ovviare al secondo tipo di errore è stata evidenziata l'importanza dell'uso delle immagini epipolari (Jayachandran, 2003; Lee & alii, 2003; Zukowskyj & alii, 2000), che permettono di ridurre l'errore di parallasse della coppia fotografica. La scelta dell'algoritmo di lettura della superficie topografica (Baillard & alii, 1997; Della Rocca & alii, 2002) avviene selezionando quello più rispondente alla realtà territoriale. Il prodotto ottenuto è generalmente affetto da una serie di errori, soprattutto nella quota, dovuti sia al modello di lettura della superficie sia agli oggetti disposti su di essa, quali, ad esempio, aree urbanizzate o forestate (Della Rocca & alii, 2002; Jacobsen, 2001). I valori errati vengono rimossi con opportuni filtri.

Per ciò che concerne la generazione di modelli digitali da immagini stereoscopiche da satellite, premesso che le leggi di generazione del modello tridimensionale sono le stesse delle foto aeree, molti test di controllo e validazione sono in corso d'opera su immagini ad alta risoluzione. Le analisi effettuate su coppie da satellite (IKONOS, QuickBird, etc.), mettono in evidenza la necessità di un numero elevato di *Ground Control Points* (GCP, punti di controllo a terra) per ridurre l'errore medio del DTM estratto (Hashimoto, 2000; Lee & alii, 2003; Vassilopoulou & alii, 2002). In ambiente alpino, come nel caso della presente ricerca, questo limite rende ancora più impegnativa l'estrazione di modelli da satellite, poiché spesso l'assenza di riferimenti antropici, la morfologia accidentata, le coperture vegetali, ma anche, talvolta, la copertura nevosa rappresentano un reale ostacolo al riconoscimento di punti noti o punti rilevati da campagna GPS.

Il DTM, che rappresenta il prodotto finale con cui effettuare le analisi glaciologiche e morfometriche, va comunque usato e applicato tenendo conto del grado di accuratezza, determinato da una serie di parametri basati sul confronto della maglia di punti (x, y, z) elaborati con quelli osservati a terra (Desmet, 1997; Li, 1988; Li, 1994; Zukowskyj & alii, 2000).

AREA DI STUDIO

L'area di studio è ubicata nella Val di Pejo, in provincia di Trento, alla testata della Val de La Mare dove è situata l'omonima vedretta. La Vedretta de La Mare fa parte del vasto sistema glaciale del massiccio dell'Ortles-Cevedale ed è racchiusa, con esposizione prevalentemente orientale, tra le propaggini delle cime del Cevedale, del Monte Rosole e la cresta della Catena Rossa, estendendosi tra un'altitudine di circa 2.630 e 3.766 m (fig. 1).

Le litologie presenti in affioramento nell'area sono metamorfiti tipo filladi, scisti e paragneiss, appartenenti alle falde di ricoprimento del dominio Austroalpino Superiore. L'assetto lito-strutturale del substrato è stato tuttavia favorevole al continuo processo di alterazione crioclastico, ren-

dendo disponibili grossi volumi di materiale che hanno caratterizzato la morfologia periglaciale.

La Val de La Mare ha la tipica forma delle valli glaciali con fianchi molto ripidi e fondi piatti, coperti da depositi fluvioglaciali e glaciali. Numerose sono le testimonianze del glacialismo quaternario e gli elementi fisiografici di maggior rilievo nell'area sono quelli relativi al modellamento glaciale e alle diverse forme di accumulo dei depositi glaciali. Oltre ai numerosi circhi e creste asimmetriche alla testata della valle, si possono osservare a diverse quote ripiani in roccia, spesso a gradinata, con superfici interessate da striature indicanti la direzione di flusso dei ghiacciai e conche di sovraescavazione glaciale che ospitano generalmente laghetti. I depositi glaciali più antichi e rappresentativi per estensione in Val de La Mare sono quelli attribuibili agli ultimi stadi del Tardiglaciale, ma quelli che conferiscono un aspetto spettacolare alla valle sono gli apparati morenici della Vedretta de La Mare, sviluppati durante la «Piccola Età Glaciale» (secoli XV-XIX), che si estendono per quasi 2 km con altezze delle creste anche di 30 m sul fondovalle. La morfogenesi di queste morene è da mettere in relazione alle oscillazioni glaciali e al grosso volume di materiale disponibile, che hanno causato il graduale innalzamento dell'alveo glaciale e, contestualmente,

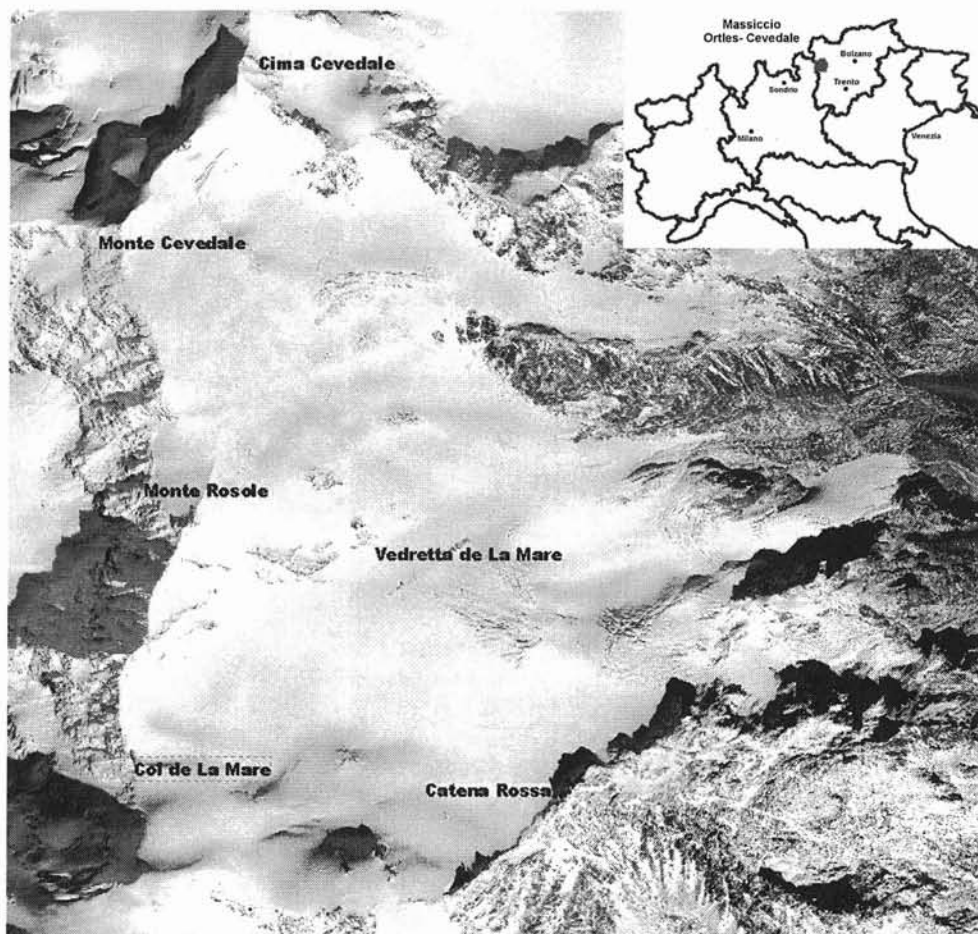


FIG. 1 - La Vedretta di Val de La Mare nell'Ortofoto digitale della Provincia Autonoma di Trento (scala originaria 1:10.000; scala della foto 1:15.000).

delle morene laterali (Gruppo Nazionale Geografia Fisica Geomorfologica, 1986).

La Vedretta de La Mare, classificabile come un ghiacciaio vallivo a bacino composto, ha una superficie odierna (2003) di circa 3,9 km². Alla pari di molti altri ghiacciai del gruppo dell'Ortles-Cevedale, da alcuni anni è in una fase di progressivo ritiro e la conseguenza più facilmente percepibile è stata un rapido regresso della fronte del ghiacciaio. Per la maggior parte dei ghiacciai alpini la «Piccola Età Glaciale» rappresenta la massima espansione glaciale degli ultimi 10.000 anni (Olocene). Il massimo è stato raggiunto per lo più nella prima metà dell'Ottocento e molti ghiacciai, tra questi anche la Vedretta de La Mare, hanno deposto la loro morena frontale più esterna intorno al 1820. A partire dalla fine dell'Ottocento la «Piccola Età Glaciale» può considerarsi conclusa e da allora i ghiacciai hanno vissuto una fase di progressivo ritiro, anche se con alcune modeste inversioni di tendenza. Per la Vedretta de La Mare sono state individuate, sulla base di indagini di campagna e analisi della documentazione cartografica e iconografica, una serie di avanzate intorno al 1920, tra il 1961 e il 1964 e dal 1971 fino a metà degli anni Ottanta. Da questo periodo in poi è iniziato un trend negativo che tutt'ora perdura, confermato dalla campagna glaciologica del 2002 che ha registrato un ritiro della fronte di 16 m rispetto ai rilievi del 2000 (Comitato Glaciologico Italiano, 2002).

La fase di ritiro ha avuto visibili conseguenze sulla Vedretta de La Mare, che oggi appare quasi definitivamente ritirata internamente agli apparati morenici della «Piccola Età Glaciale». La fronte si presenta sempre più appiattita e priva di detrito nella parte terminale; la lingua glaciale, che ancora all'inizio degli anni Ottanta costituiva un unico corpo, oggi appare frammentata all'altezza della soglia di quota 2.920 m (fig. 2). Uno sperone roccioso suddivide la lingua glaciale in due rami, di cui quello più a monte appare arretrato di circa 500 m rispetto al secondo, che costituisce l'attuale fronte, ed è parzialmente coperto da detrito. Altra conseguenza è la riduzione areale e di spessore del ghiacciaio, con emersione di masse rocciose anche nel settore di alimentazione e lungo le creste. In prossimità di queste aree si è intensificato il processo di ablazione, a seguito delle modificazioni dell'albedo della superficie. Nell'estate 2003, che ha registrato temperature molto al di sopra delle medie stagionali, questo fenomeno è risultato particolarmente intenso in prossimità dei fianchi dello sperone sottostante il Monte Rosole, a quota 3.312 m, dove si sono verificati costanti crolli di materiale sul pendio glaciale. L'estate è stata eccezionalmente calda e, a partire dall'inizio di giugno fino alla fine di agosto, ci sono stati lunghi periodi in cui lo zero termico diurno si è mantenuto sopra i 3.500 m – tra il 5 luglio ed il 10 agosto quasi sempre oltrei i 4000 m (Comitato Glaciologico Trentino SAT, 2003) – sino a raggiungere quote di 5.300-5.400 m tra il 4 ed il 6 agosto. Al lago del Careser (2.600 m s.l.m.), situato sull'opposto versante dell'apparato glaciale, la temperatura media del mese di agosto è risultata essere di 7,6 °C, ossia di 2,5 °C superiore alla media del periodo 1937-2003, mentre quella di luglio e di giugno hanno registrato scarti positivi dalla medie di 1,6 e 0,8 °C (Fazzini, dato inedito) Questa condi-

zione termica ha causato l'esposizione diretta del ghiaccio della Vedretta de La Mare a una quota inferiore ai 3.100/3.200 m (a seconda dell'esposizione), come visibile nell'ortofoto 3D dell'immagine satellitare dell'11 agosto (fig. 4b). Sulla superficie glaciale è stato osservato un intenso fenomeno di fusione durante l'arco della giornata, che talvolta non si è arrestato neanche nelle ore notturne.

Le ragioni che hanno orientato questa ricerca sulla Vedretta de La Mare sono sia di ordine pratico sia metodologiche. Di fatto il ghiacciaio è sufficientemente esteso e articolato da soddisfare le esigenze della ricerca, ma, al contempo, ha una dimensione contenuta, tale da ridurre i costi di acquisizione ed elaborazione dati (complessivamente l'area di studio è di circa 12 km²). Inoltre l'area è ben nota, dal punto di vista glaciologico e geomorfologico, dall'inizio del secolo (Desio, 1927) ed esiste una notevole quantità di documentazione cartografica e fotografica a partire dal 1800 in poi su cui poter effettuare le diverse analisi. Inoltre, in ragione alla praticità nelle elaborazioni in ambiente GIS vi è una discreta disponibilità di dati già in forma digitale, quali punti trigonometrici, curve di livello, foto aeree.

In aree periglaciali, la presenza di potenti accumuli morenici, gradini e scarpate, rilievi isolati, superfici sub-pianeggianti e apparati lacustri permette di investigare molte delle forme tipiche dell'ambiente alpino e offre una serie di punti di riferimento per la correzione e la georeferenziazione del dato digitale. L'area glaciale è invece ben delimitata da spartiacque facilmente identificabili (ad eccezione del settore a sud del Col de La Mare, che presenta una complessità maggiore) e mostra caratteri generali rappresentativi di diversi apparati glaciali alpini (piccolo plateau di cima, fascia seraccata intermedia, area sub-pianeggiante di fondovalle e lingua glaciale).

METODOLOGIA DELLA RICERCA

Uno degli obiettivi fondamentali della ricerca è quello di verificare la reale e significativa possibilità di realizzare un confronto del contenuto planaltimetrico di dati tipologicamente e qualitativamente molto differenti, quali cartografie storiche e recenti e informazioni topografiche oggi ottenibili direttamente dai sistemi di rilievo telerilevati. Il recupero delle numerose informazioni già esistenti nella cartografia storica, come noto, è importante per la ricostruzione temporale dell'evoluzione glaciale. La buona disponibilità di informazioni cartografiche per la Vedretta de La Mare ha consentito di selezionare una serie storica che va dal 1910 al 1990, contenente sia elementi facilmente convertibili in dati digitali, sia cartografie di riferimento utili per i confronti planimetrici. Inoltre, sono stati acquisiti diversi voli aerei e una coppia stereo dal satellite EROS A1 realizzata nell'estate del 2003 (11 agosto); questo porta l'arco temporale analizzato a quasi un secolo (tab. 1).

Le informazioni cartografiche di base, acquisite e realizzate in diverso formato, per essere elaborate in ambiente GIS (ArcGIS 8.3 ESRI) sono state tutte rese in formato digitale, sia *raster* che vettoriale, e di seguito georiferite nella proiezione conforme di Gauss Boaga adottata dalla Provin-

FIG. 2 - L'attuale fronte della Vedretta de La Mare (b) e la stessa area in una foto di Desio dell'agosto del 1932 (a). Si noti, nel riquadro della foto del 1932, l'affioramento di roccia completamente scoperto nella foto dell'estate 2003.



cia Autonoma di Trento. Per i dati analogici è stata effettuata la scansione ad alta risoluzione (800 dpi 24 bit di colore), per rendere possibile il riconoscimento di dettagli topografici utili alle operazioni seguenti di estrazione dei modelli.

La georeferenziazione delle immagini *raster*, soprattutto quelle relative alle cartografie storiche, ha richiesto un controllo di precisione rispetto ai punti di riferimento da adottare come vincoli delle operazioni di georiferimento, e a tal fine sono stati utilizzati i punti trigonometrici IGM riconoscibili nelle diverse carte topografiche a disposizione, oltre quelli di coordinate geografiche di cartiglio. La georeferenziazione delle carte topografiche, al fine di avere un riferimento geografico di base univoco, ha fatto riferimento alla carta IGM alla scala 1:25.000 relativa alla tavoletta F9 IIIINE «Monte Cevedale», inquadrata nel sistema di riferimento Gauss Boaga (Monte Mario 1940), e vincolata al reticolo vettoriale d'inquadratura ufficiale dell'IGM. Da questo riferimento si è provveduto al successivo georiferimento di tutte le immagini *raster*, oltre all'utilizzazione dei punti trigonometrici IGM noti e riconoscibili.

Di fatto la georeferenziazione delle basi topografiche della serie cartografica storica permette un primo confronto

TABELLA 1 - Dati utilizzati per le elaborazioni

Cartografia Anno	Tipo	Scala	Origine
1990	Rilievo aerofotogrammetrico	1:5.000	
1983	Carta Tecnica Generale	1:10.000	Provincia Autonoma di Trento
1963	Carta d'Italia F.9 III NE «M.te Cevedale»	1:25.000	Istituto Geografico Militare
1912	Carta d'Italia F.9 III NE «M.te Cevedale»	1:25.000	Istituto Geografico Militare
1910	«Bormio und Passo Tonale» Z20 col III	1:75.000	Istituto Geografico Militare Austriaco

Immagini Anno	Tipo	Scala	Origine
2003	Immagine satellite EROS A1	Risoluzione 1.8 metri	Informatica per il Territorio S.r.l. (IPT)
2001	Foto aerea (TerraItaly)	1:32.000	CGR Parma
2000	Ortofoto	1:10:000	PAT
1994	Ortofoto	1:10:000	PAT
1983	Foto aerea	1:28.000	PAT

to delle forme planari dell'andamento del ghiacciaio e una prima stima dei valori di modificazioni, che con la realizzazione delle ortofotocarte, fino al 2003, ha permesso di completare la successione delle informazioni topografiche a disposizione. La georeferenziazione, inoltre, ha consentito l'omogeneizzazione dei dati presenti a diversa scala e la verifica delle congruità geometriche e topografiche delle informazioni di partenza. Sulla base di questa verifica si è scelto di non recuperare le cartografie storiche più antiche, se non per le informazioni di valore qualitativo deducibili.

La prima fase è stata la realizzazione dei DTM della superficie glaciale a partire dalle cartografie disponibili, per rendere inizialmente possibile il confronto planimetrico e la successive operazioni di analisi su DTM in ambiente GIS. Parallelamente a questo, tutte le serie dei voli aerei costituiti da foto in formato cartaceo sono state scandite con risoluzione di almeno 1.200 dpi con 256 livelli di grigio o colore, per essere trattate nei sistemi di fotogrammetria digitale di seguito descritti. La raccolta e preparazione dei dati di base ha comportato un importante lavoro di controllo, per integrare le informazioni planoaltimetriche e rendere confrontabili, dal momento che le foto utilizzate presentavano differenze nei piani quotati, scale, sistemi di restituzione fotogrammetrica e periodi di acquisizione. Si è proceduto quindi alla digitalizzazione delle curve di livello dalle cartografie *raster* georiferite, all'estrazione diretta dei DTM dalle coppie stereo acquisite e alla omogeneizzazione della risoluzione di lavoro, portata a 10 m. La scelta di questa risoluzione, pur potendo scendere per alcune sorgenti dati a risoluzioni inferiori ai 5 m, è stata dettata dalla necessità di avere il massimo numero di strati informativi omogenei con il minimo errore e di rendere confrontabile

il dato digitale con la risoluzione di quello derivato dalla cartografia.

L'estrazione di DTM da coppie stereo è notevolmente più complessa della precedente e necessita di *software* adeguati e di una qualità maggiore del dato di base. Al fine di poter estrarre modelli digitali del terreno ad alta risoluzione sono stati individuati due *software* commerciali (*Orthoengine*, *PCI-Geomatics - RFDGeo-evo*, *Geotop*), con cui ottenere da coppie stereoscopiche (foto aeree o immagini da satellite) i modelli necessari all'analisi multi-temporale della Vedretta de La Mare. Tali strumenti sono sostanzialmente dei fotorestitutori digitali, in cui la coppia di immagini deve essere orientata geograficamente, tramite l'inserimento di alcuni punti di controllo a terra (GCP) dai quali dipende sostanzialmente l'accuratezza dei modelli prodotti.

Una volta ottenuto il modello stereoscopico orientato, tali *software* hanno prodotto, in modo più o meno articolato, punti quotati, curve di livello o modelli digitali già interpolati. La differenza nei *software* utilizzati è che *Orthoengine*, una volta definito il modello stereoscopico, produce il modello digitale senza poter intervenire sull'algoritmo di estrapolazione e/o tridimensionalmente sul dato, mentre il *software* di fotogrammetria *RFD* permette di selezionare, in una lista predefinita, l'algoritmo di lettura del territorio, scegliere nella fase di estrazione dati quale tipologia di punti estrarre e, successivamente all'elaborazione, offre la possibilità di intervenire tridimensionalmente sul dato per rimuovere e/o modificare i dati incongruenti.

Per ridurre al minimo l'incertezza nell'orientamento dei differenti modelli stereoscopici nel tempo sono stati individuati punti di riferimento a terra, definiti da elementi morfologici e/o da strutture antropiche che fossero stabili e riconoscibili nel tempo (punti trigonometrici e punti noti). La scelta di punti di riferimento comuni per tutti i modelli è dettata dalla necessità di avere aree stabili e ben riconoscibili anche nei periodi primaverili con copertura nevosa.

Ad integrazione è stata eseguita una campagna GPS (*NOVATEL Millenium*) con correzione differenziale delle misure raccolte, al fine di tarare e controllare i punti di controllo selezionati. Questa operazione ha visto essenzialmente il rilievo dei sentieri e dei punti notevoli (Rifugio Cevedale, massi erratici, laghetti, creste) più importanti dell'area di studio, tali da essere individuati con facilità sulle immagini telerilevate, poiché, come già descritto, il riconoscimento dei GCP è un elemento discriminante per la qualità della restituzione del DTM (fig. 3).

I dati elaborati dai *software* di estrazione del modello digitale di terreno sono stati in primo luogo controllati direttamente sul modello tridimensionale; per ciò che concerne la correttezza delle quote, in presenza di anomalie i punti quotati sono stati modificati o rimossi, per migliorare il dato in uscita. In talune situazioni, ove la copertura del manto nevoso è risultata uniforme e disposta su superfici subpianeggianti, è emerso che gli algoritmi di estrazione non sono in grado di leggere nessuna quota (quindi restituire punti quotati) a causa dell'assenza di variazioni di tono nell'immagine. Per ovviare a tale inconveniente è stato creato un *layer* di punti integrativi, individuati pun-

FIG. 3 - Rilievi GPS in continuo (modalità dinamica) sulla superficie del ghiacciaio.



tualmente sul modello tridimensionale dall'operatore. Tale procedura ha permesso di migliorare il dato estratto dal modello stereoscopico. Il modello ottenuto è quindi stato esportato in formato testo *ascii* (DTM), per essere inserito nel progetto GIS e successivamente controllato e confrontato con altri modelli, sottoponendo quindi a validazione il dato planoaltimetrico ricostruito.

Per poter confermare che i dati dei modelli estratti fossero rispondenti alla realtà territoriale, sono stati selezionati settori stabili in roccia nell'area di studio. Su queste aree, tramite comparazione diretta delle quote, è stato fatto un controllo a campione in modo casuale, per poterne osservare la rispondenza. Le aree che da tale controllo hanno mostrato variazioni significative sono state filtrate nuovamente, modificando sul dato puntuale i dati altimetrici. Tale operazione di controllo ha fornito valori maggiormente attendibili quando la quantità delle informazioni geografiche a disposizione era maggiore, consentendo diversi controlli incrociati. In quei settori, viceversa, in cui l'elaborazione del dato tridimensionale presentava picchi di massimo o minimo troppo discostanti dalle quote circostanti, dopo un opportuno controllo incrociato sul modello stereoscopico, questi sono stati rimossi e/o modificati. Infine, ottenuto un modello congruente con la realtà territoriale del periodo di riferimento, si è passati all'elaborazione del modello digitale di terreno (tramite interpolatori polinomiali bivariati); il dato ottenuto è stato successivamente filtrato in modo digitale, rimuovendo le piccole anomalie del terreno, poco significative e di dubbia esistenza.

Infine, un ulteriore controllo sull'accuratezza del dato elaborato è stato effettuato estraendo le curve di livello dal modello digitale e confrontandole con le curve esistenti, al fine di registrare eventuali scostamenti significativi che potessero influenzare l'analisi di variazione morfometrica, sia planimetrica che altimetrica. In ultimo sono stati confrontati i modelli digitali di uno stesso periodo elaborati dai differenti sistemi.

Da ogni coppia di fotogrammi utilizzata per ottenere il modello tridimensionale nei vari intervalli di tempo analizzati, è stata elaborata, parallelamente, una relativa immagine ortorettificata (ortofoto), necessaria per effettuare i controlli planimetrici delle variazioni del ghiacciaio nel tempo.

Nell'elaborazione dei dati planimetrici da ortofoto è stato possibile includere anche il periodo 2003, relativo alla coppia stereoscopica delle immagini da satellite EROS A1 (fig. 6), con risoluzione di 1,80 m in pancromatico, messa a disposizione da Informatica per il Territorio (IPT). Tale coppia stereoscopica, purtroppo, non ha permesso di ottenere un modello digitale ad alta risoluzione molto accurato, in quanto ancora non sono state definite, per le stesse, procedure collaudate sull'estrazione di un modello accurato. I controlli eseguiti sul modello estratto da tale coppia di immagini hanno infatti restituito valori di errore superiore alla risoluzione del modello stesso. Al fine di poter ottenere modelli digitali anche da questi set di dati sono ancora in corso studi di taratura, atti a definire delle procedure standard di estrazione.

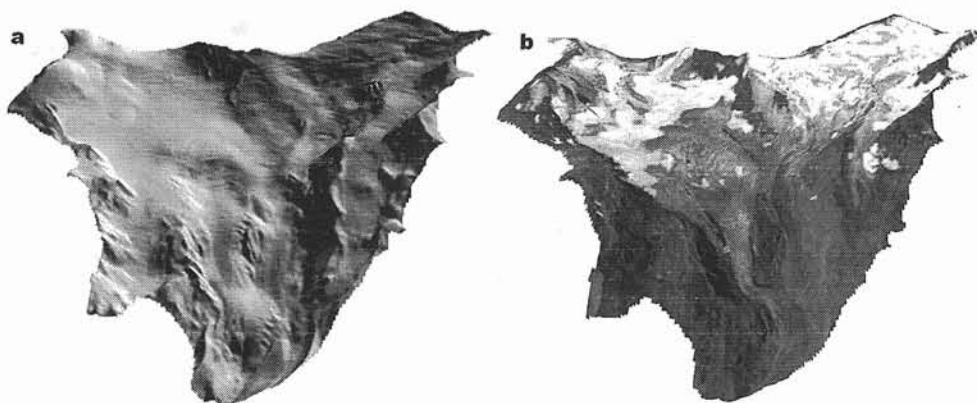


FIG. 4 - a) Modello a ombre del DTM generato da Rilievo aereofotogrammetrico del 1990; b) Ortofoto EROS A1 del 11 agosto 2003 sul DTM.

ANALISI DEI DATI

In questa fase iniziale della ricerca il prodotto del trattamento dei dati di base, ovvero la rappresentazione 3D in un determinato anno della Val de La Mare, ha consentito soprattutto la verifica della qualità dell'elaborazione. Dal punto di vista dell'interpretazione glaciologica dei risultati sono stati effettuati un confronto planimetrico e una prima analisi di alcuni indicatori morfometrici, subordinando l'analisi volumetrica all'acquisizione di nuove informazioni e al miglioramento dell'accuratezza di quelle in nostro possesso, con particolare riferimento al nuovo dato satellitare.

Per quanto concerne il confronto planimetrico è stata inoltre effettuata una georeferenziazione delle cartografie disponibili e sono state realizzate le ortofoto delle foto aeree e delle immagini satellitari. Il confronto di tutti i perimetri (fig. 5) mostra generalmente una continua perdita di superficie glaciale della Vedretta. Il dato più antico utilizzato (Carta KuK. Militaer Geographische Institut, scala 1:75.000 «Bormio und Passo del Tonale», edita nel 1910 su rilievi presumibilmente del 1894) rappresenta la Vedretta de la Mare con un'estensione di circa 6 km². La fronte del ghiacciaio è segnata a quota 2.462 m, anche se un confronto con punti di riferimento identificabili e con la cartografia dell'IGM del medesimo periodo lascia ipotizzare che la fronte dovesse essere ubicata presso l'attuale isoipsa 2.350 m (Gruppo Nazionale Geografia Fisica Geomorfologica, 1986). Il ghiacciaio viene rappresentato con un'estensione continua, senza alcun affioramento del substrato roccioso, e copre l'area sottostante la cresta che sale dal Passo della Forcola e alcuni settori a Nord del Dosso di Venezia.

I tratti salienti delle successive rappresentazioni sono il progressivo regresso frontale, la riduzione della crepacciatura, la riduzione areale e di spessore, l'isolamento di masse di ghiaccio e l'affioramento, lungo lo sperone che scende dal Monte Rosole, di estese porzioni di roccia. Fa eccezione il dato dell'IGM 1:25.000 del 1963 (foto aeree del 1959), dove si constata una diminuzione del 18,5% dell'area glaciale rispetto all'IGM 1:25.000 del 1912 (rilievi del 1908), ma anche una diminuzione del 7% rispetto alla più recente CTP 1:10.000 derivante da restituzione fotogrammetrica del volo del 1983. Come già detto, questo è da riferire alle fluttuazioni della Vedretta de La Mare, che nel

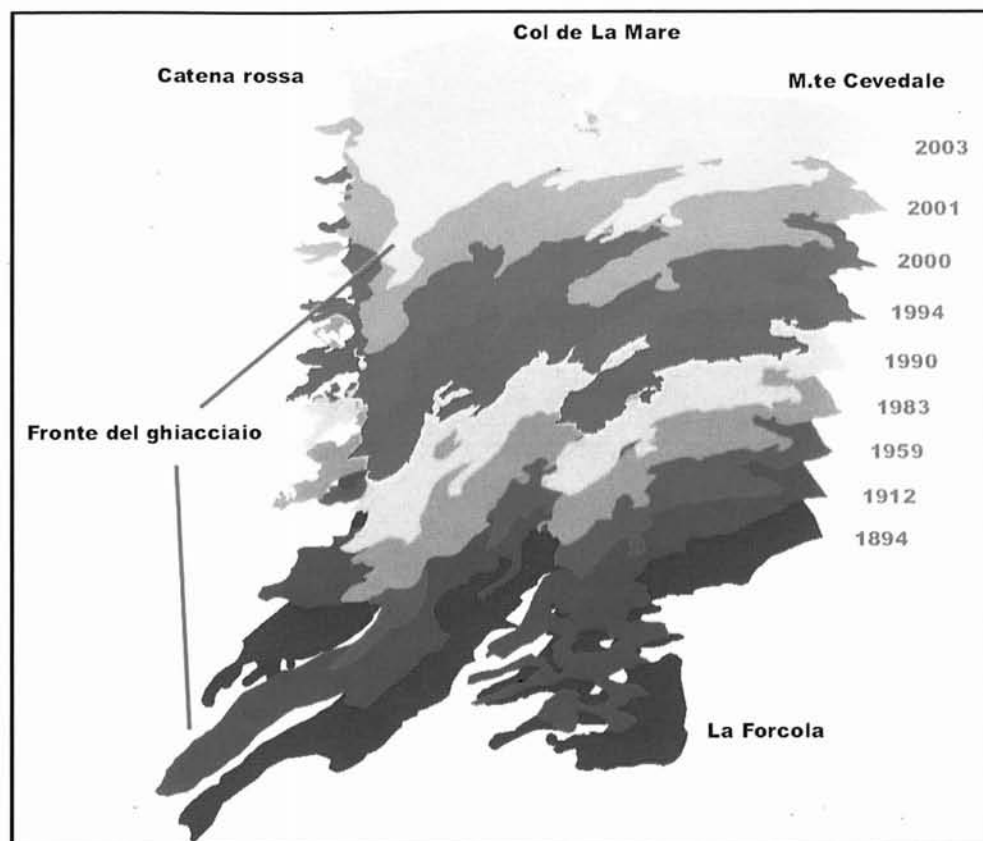
1959 era alle soglie di un modesto periodo di espansione, culminato proprio nel 1983.

Dai modelli digitali del terreno è possibile estrarre importanti informazioni morfometriche. Un grid raccoglie i valori della quota per ogni cella e da questi è possibile risalire alla forma della superficie, mediante l'elaborazione di attributi topografici, classificati in letteratura in vario modo sia sulla base delle peculiarità dell'attributo computato sia sulla base della significatività della sua estensione spaziale. È comunque usuale distinguere in attributi primari quelli derivabili direttamente dal DTM e in attributi secondari quelli ottenibili dalla combinazione dei primari, che possono caratterizzare, tramite indicatori fisici o indicatori empiricamente calcolati, la variabilità spaziale di specifici processi che si verificano sul territorio (Pike, 1988; Wilson & Gallant, 2000). Sono stati utilizzati alcuni attributi primari (tab. 2) per l'analisi dei DTM, sia per un confronto tra DTM generati dalla medesima sorgente (volo 1983) ma con procedimenti differenti, sia per verificare l'idoneità degli attributi a caratterizzare il «comportamento evolutivo» della Vedretta de La Mare nel periodo temporale preso in considerazione.

TABELLA 2 - Elenco degli attributi primari del DTM utilizzati

Attributo primario	Metodo di calcolo	Descrizione sommaria
<i>Hmin, Hmax & Hmean</i>	Calcolate mediante <i>Neighborhood statistic</i> su una maglia di 10x10 celle	Quote minima, massima e media. Sono informazioni indispensabili al calcolo dei successivi attributi primari e per le analisi statistiche
<i>Slope</i>	Derivata prima di H (metodo Horn) del DTM ricampionato a 10x10 celle	Indicazioni sulla stabilità dei pendii, tipologia del rilievo, erosione, ecc.
<i>Local relief (Riloc)</i>	Hmax-Hmin in un intorno di 10x10 celle	Esprime l'energia di rilievo e fornisce informazioni sulla rugosità della superficie oltre a indicazioni generali sui processi morfogenetici in atto
<i>Topographic irregularity (Irrtop)</i>	Deviazione standard di H in un intorno di 5x5 celle	Fornisce indicazioni sull'irregolarità del rilievo misurando la «quantità media» di scostamento dell'altezza dalla media
<i>Local irregularity (Rug)</i>	Derivata seconda di H	Fornisce una stima delle caratteristiche morfometriche del rilievo, del tipo (areale e/o lineare) ed entità dei processi erosivi

FIG. 5 - Confronto multitemporale tra i perimetri dell'area coperta dal ghiaccio (in blu da foto aerea ed immagini da satellite, in verde da cartografia).



Il confronto tra il DTM della Provincia di Trento (passo a 10 m, generato sulla base della CTP 1:10.000 derivata a sua volta da fotorestituzione del volo 1983) e quello generato dal software RDF ha messo in evidenza, in primo luogo, la differenza tra i due nel dettaglio delle informazioni sulla superficie. Il DTM direttamente generato dalle foto aeree, pur presentando alcuni errori diffusi che hanno richiesto numerosi filtraggi per essere attenuati, risulta più accurato nel descrivere le variazioni altimetriche e consente un'analisi morfometrica di maggior dettaglio. La ragione

di ciò risiede nelle procedure normalmente utilizzate per la realizzazione dei DTM attualmente disponibili presso diversi Enti locali. Il DTM viene generato a partire dall'altimetria (punti quotati, curve di livello, piani quotati) delle carte tecniche a scala 1:10.000, che derivano a loro volta da fotorestituzione di coppie stereo. Realizzare un DTM dalla sorgente originale riduce l'entità dell'errore sistematico e cumulativo e lo *smoothing* (filtraggio) della superficie del DTM. Queste differenze sono apprezzabili nel confronto tra le curve di livello (fig. 6), e le ortofoto; in en-

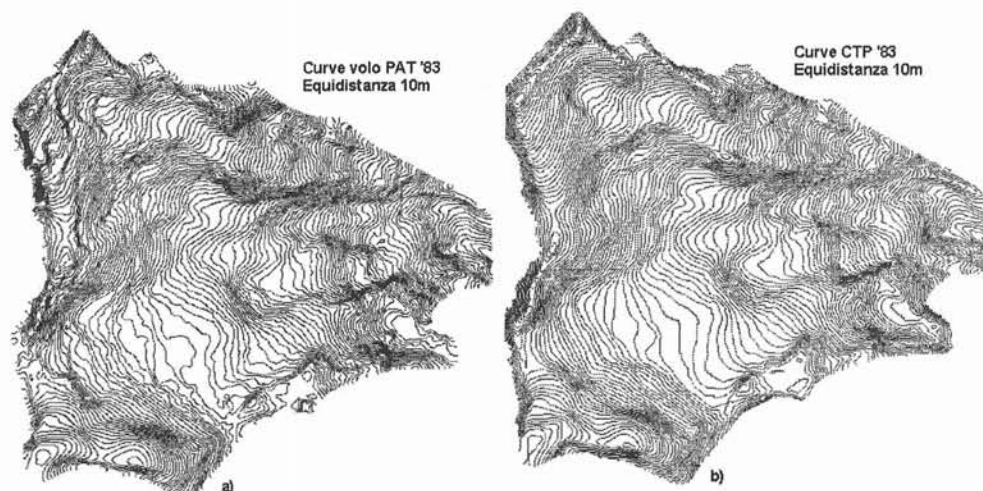


FIG. 6 - Curve di livello generate da diversi DTM relativi alla medesima sorgente (Volo 1983).

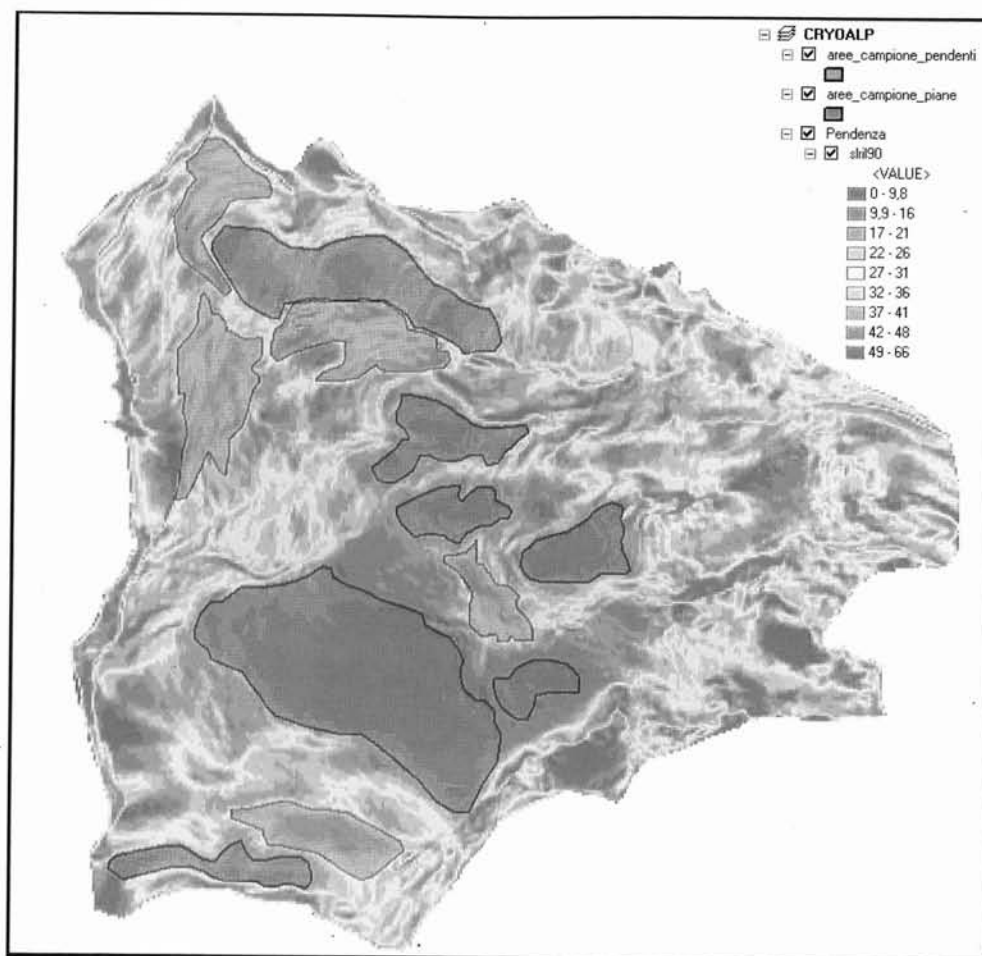


FIG. 7 - Aree campione subpianeggianti (blu) e in forte pendenza (viola), sovrapposte al layer slope del 1990.

trambi i casi è stato riscontrato un maggior segnale delle aree a forte contrasto di pendenza, quindi seraccate e passaggi ghiaccio/roccia.

Dal punto di vista morfologico le prime analisi statistiche in zone campione (fig. 7) hanno messo in evidenza una risposta differente a seconda dell'acclività dei settori presi in considerazione. Sono stati utilizzati operatori di *map-algebra* (*zonal statistics*) sui tematismi dei quattro attributi primari considerati ed è stato riscontrato che le aree subpianeggianti, a partire dal 1959 (IGM 25.000), hanno subito un costante appiattimento. Questa evoluzione, tipica di un ghiacciaio in fase di ritiro, mostra una diminuzione tra i 4 e 5 gradi di pendenza a seconda dell'area campione considerata. Parallelamente, in aree a forte pendenza dove ancora non affiora il substrato, gli attributi che forniscono informazioni sull'energia del rilievo (rugosità, irregolarità topografica e rilievo locale) mostrano un graduale aumento di valore (fig. 8). La tendenza è indicativa dell'aumento di irregolarità (seracchi) della superficie glaciale e del futuro affioramento di estese porzioni di roccia, come confermato dal confronto con le successive immagini fotografiche.

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Lo scopo della ricerca era soprattutto nell'individuazione, per ciascuna sorgente di dati, di una metodologia che restituisse in tempi brevi il massimo dell'informazione planoaltimetrica, con riferimento alla qualità del dato estratto (correttezza e accuratezza) e alla praticità delle elaborazioni (tempi di realizzazione, punti a terra necessari, modificabilità del dato prodotto). Il primo elemento di incertezza era rappresentato dai *software* disponibili per l'estrazione di immagini da coppie stereo. Sia *Orthoengine* che *RDF* sono risultati affidabili in termini di correttezza del dato nell'attribuzione dei valori spaziali (x, y, z), ma il secondo risulta essere, in aree a elevata variabilità morfologica, più efficace per la sua maggiore modularità, che permette di intervenire tridimensionalmente sul dato stesso in modo puntuale. Queste prove hanno allo stesso tempo segnalato l'importanza della qualità del dato fotografico o da satellite, marcando la difficoltà dei *software* stessi a estrarre un modello congruente, se la coppia stereoscopica utilizzata presenta forti distorsioni o malformazioni (nuvole, foto fortemente distorte, etc.).

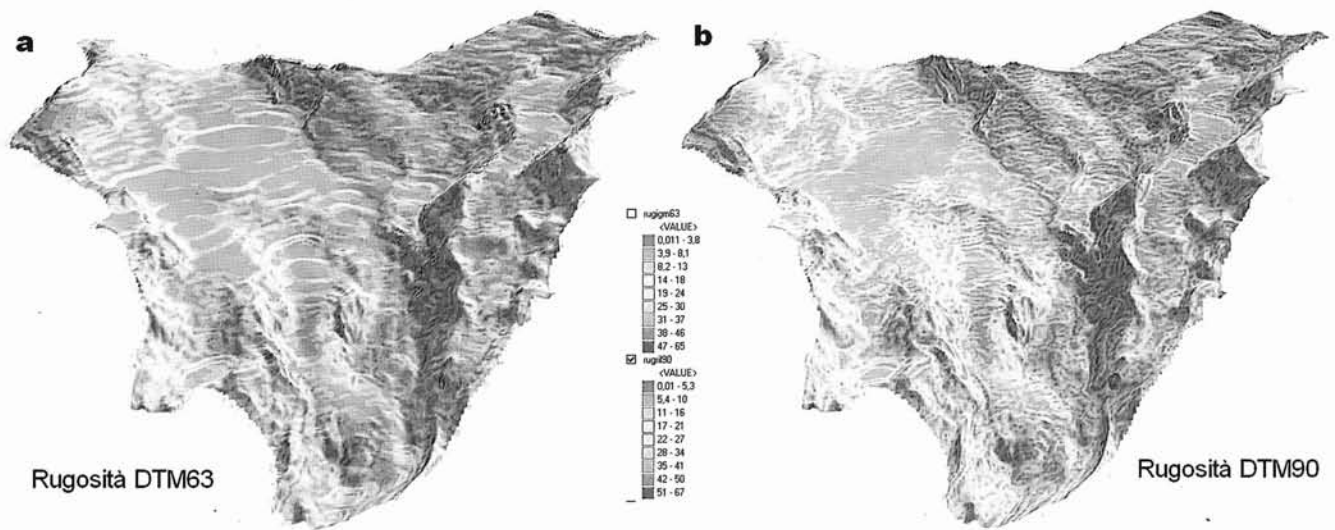


FIG. 8 - Confronto tra la distribuzione della rugosità derivata dal DTM del 1963 (a) e dal DTM del 1990. Si noti l'accentuazione della complessità della superficie (blu) in corrispondenza delle aree a forte pendenza.

Un ulteriore obiettivo dello studio è stato quello di definire l'attendibilità del dato geografico, considerando, ad esempio, che alcuni punti trigonometrici forniti dalla Provincia di Trento o dall'IGM non ribattevano i punti omologhi sulle carte topografiche e/o sulle ortofoto digitali. Questo ha reso necessario un controllo sulla qualità del dato originale di partenza, avvalendosi anche della campagna GPS. Definito il dato geografico di riferimento in modo accurato, sono stati riconvertiti sulla base di questo tutti i dati storici reperiti in cartaceo e trasformati dopo geocodifica in formato *raster*, al fine di poter eseguire l'analisi planimetrica multi-temporale sull'evoluzione tra il 1894 e il 2003.

Infine, sempre dal punto di vista tecnologico, si è cercato di trovare nella metodologia applicata procedure confrontabili, poiché è apparso sempre più chiaro, con il proseguire della sperimentazione, quanti parametri importanti fossero in gioco e come questi potessero influenzare in modo significativo i risultati delle elaborazioni. È stato così possibile identificare una metodologia che garantisse l'attendibilità delle informazioni estratte e permettesse di definire alcuni standard per l'applicazione delle tecniche utilizzate in altri contesti.

Le prime analisi morfometriche mostrano una buona corrispondenza tra le informazioni estraibili dai DTM generati e le risposte della Vedretta de La Mare ai cambiamenti climatici in atto. Questo incoraggia l'uso di tali tecniche per il monitoraggio delle aree glaciali a supporto dei rilevamenti di terra, considerando inoltre l'opportunità di utilizzare in modo continuo le informazioni ad alta risoluzione (submetriche) offerte dalle nuove piattaforme da satellite o aeree.

È comunque evidente la necessità di strutturare più velocemente possibile l'informazione digitale raccolta. La

complessità delle informazioni raccolte a supporto delle indagini glaciologiche (sia a terra che da *remote sensing*) e la loro multitemporalità ha messo in evidenza l'opportunità di realizzare un apposito *GIS Data model* (modelli di dati). Tale modello dati consentirebbe di unificare in un unico contenitore il database geografico con quello alfanumerico: in questo caso i dati geografici vettoriali potrebbero essere inseriti nelle tabelle di un database relazionale, che, in definitiva, diventerebbe il contenitore unico dei dati territoriali. Sfruttando le possibilità offerte dal database relazionale si potranno implementare nel GIS le relazioni che consentano di descrivere il comportamento del fenomeno glaciale.

Di fatto, questi primi risultati confermano sia la qualità delle informazioni deducibili dai DTM generati sia l'opportunità di avvalersi della tecnologia in corso di studio per l'analisi speditiva dell'evoluzione di un ghiacciaio.

BIBLIOGRAFIA

- AMADESI E. (1993) - *Manuale di Fotointerpretazione con elementi di fotogrammetria*. Pitagora, Bologna.
- BAILLARD C., DISSARD O., JAMET O. & MAITRE H. (1997) - *Extraction and textural characterization of above-ground areas from aerial stereo pairs: a quality assessment*. ISPRS Jour. Photogram. Rem. Sen., 53 (1), 130-141.
- COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (2002) - *Relazioni della campagna glaciologica 2002*. Geog. Fis. Dinam. Quat. 26 (2), 147-262.
- COMITATO GLACIOLOGICO TRENINO SAT (2003) - *La lunga estate calda sui ghiacciai del Parco*. Parco Adamello Brenta, 7, 3-4, 12-16.
- DELLA ROCCA A.B., LA PORTA L., BORFECCHIS F., POLLINO M. & ARCASENZA M. (2002) - *Sviluppo di modelli 3D di aree urbane tramite tecniche di aerofotogrammetria digitale*. Atti 6° Conferenza ASITA, Perugia 2002.

- DESIO A. (1927) - *Appunti ed osservazioni sui ghiacciai del Gruppo Ortles-Cevedale (Campagne glaciologiche del 1925-1926)*. Atti Soc. It. Sc. Nat., 64, 209-272.
- DESMET P.J.J. (1997) - *Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs*. Earth Surf. Proc. and Landforms, 22 (5), 563-580.
- GIADA M. & ZANON G. (1991) - *Variazioni di livello e volumetriche sulla vedretta del Careser (Gruppo Ortles-Cevedale) tra il 1980 e il 1990*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 14, 221-228.
- GRUPPO NAZIONALE GEOGRAFIA FISICA GEOMORFOLOGICA, C.N.R. (1986) - *Ricerche geomorfologiche nell'Alta Val di Pejo (Gruppo del Cevedale)*, Geogr. Fis. Dinam. Quat., 9, 143-144.
- FREZZOTTI M., CAPRA A. & VITTUARI L. (1998) - *Comparison between glacier ice velocities inferred from GPS and sequential satellite images*. Ann. of Glaciol., 27, 54-60.
- HASHIMOTO T. (2000) - *Dem generation from stereo AVNIR images*. Adv. Space Res., 25 (5), 931-936.
- JACOBSEN K. (2001) - *PC-Based Digital Photogrammetry*. Workshop on Data Analysis and Image Processing Techniques, Damascus, Gora, March 2001.
- JAYACHANDRAN M. (2003) - *Dem accuracy in analytical and digital photogrammetry*. GIS @ development magazine on-line, March 2003.
- KÄÄB A. (2002) - *Monitoring high-mountain terrain deformation from repeated air- and spaceborne optical data: examples using digital aerial imagery and ASTER data*. ISPRS Journ. Photogram. Rem. Sen., 57, 39-52.
- LANZI C., VASSENA G. & SMIRAGLIA C. (2001) - *Metodologia di utilizzo integrato di strumentazione GPS e di dati cartografici per lo studio dell'evoluzione dei DEM di apparati glaciali*. Atti della 5ª conferenza ASITA, vol. 2.
- LEE H.Y., KIM T., PARK W. & LEE H.K. (2003) - *Extraction of digital elevation models from satellite stereo images through stereo matching based on epipolarity and scene geometry*. Image Vis. Computing, 21, 789-796.
- LI Z. (1988) - *On the measure of digital terrain model accuracy*. Photogram. Record, 14 (7), 113-128.
- LI Z. (1994) - *A comparative study of the accuracy of digital terrain models (DTMs) based on various data models*. ISPRS, Jour. Photogram. Rem. Sen., 49 (1), 2-11.
- LILLESAND T.M. & KIEFER R.W. (1998) - *Remote Sensing and image interpretation*. 3rd Ed., Wiley, New York.
- PIKE R.J. (1988) - *The Geometric Signature: quantifying landslide terrain types from Digital Elevation Model*. Mathematical Geol., 20, 5, 491-511.
- VASSILOPOULOU S., HURNI L., DIETRICH V., BALTSAVIAS E., PATERAKI M., LAGIOS E. & PARCHARIDIS I. (2002) - *Orthophoto generation using IKONOS imagery and high-resolution DEM: a case study on volcanic hazard monitoring of Nisyros Island (Greece)*. ISPRS Jour. Photogram. & Rem. Sen., 57 (1), 24-38.
- WILSON J.P. & GALLANT J.C. (2000) - *Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wiley, New York.
- ZUKOWSKYJ P., TEEUW R. & MUNRO O. (2000) - *Interpolated Digital Elevation Models, Differential Global Positioning System Surveys and Digital Photogrammetry: A Quantitative Comparison of Accuracy from a Geomorphological Perspective*. Proceedings of the 5th International Conference on GeoComputation, August 2000, Greenwich (UK).