



APPLICAZIONI DELLA TECNICA TDR PER LA VALUTAZIONE DI DENSITA' E CONTENUTO IDRICO EQUIVALENTE DEL MANTO NEVOSO

M. Previati¹, I. Bevilacqua¹, D. Canone¹, D. Pognant¹, S. Ferraris¹

(1) Dipartimento di Economia e Ingegneria Agraria, Forestale e Ambientale, Università degli Studi di Torino

SOMMARIO

In questi ultimi decenni è andata progressivamente aumentando la sensibilità verso la risorsa idrica nivo- glaciale, sia per fini scientifici, che per una sua più razionale utilizzazione per usi civili, potabili, irrigui ed energetici. Ciò sta portando alla necessità di stimare in modo più speditivo, e per ampi bacini, parametri fisici della neve, quali la densità del manto e il contenuto idrico equivalente (Snow Water Equivalent - SWE).

Il dato di SWE viene solitamente stimato a seguito di misure puntuali di spessore della neve, con tecnica tradizionale, unitamente all'escavazione manuale di trincee nel manto nevoso per il rilievo dei profili verticali di densità. Tuttavia, la tecnica tradizionale, quando applicata a scala di bacino, risulta onerosa per le tempistiche di rilievo e il rilevante impiego di risorse umane, spesso approssimativa a causa dell'elevata e variabilità morfologica della copertura nevosa (e.g.: esposizione, pendenza e quota) e talvolta addirittura insostenibile in caso di accumuli superiori a 3-4 metri (peraltro comunissimi in zone ventate).

La Riflettometria nel Dominio del Tempo, se opportunamente calibrata, può fornire interessanti opportunità in termini di velocità, affidabilità ed accuratezza di misura di parametri nivologici della copertura, quali permittività apparente del sistema "neve" e densità del manto indispensabili per la stima del contenuto idrico equivalente del manto nevoso.

Parole chiave: Time Domain Reflectometry, permittività, densità del manto nevoso.

1 INTRODUZIONE

In tempi relativamente recenti l'attenzione verso la tutela del patrimonio nivoglacologico mondiale, e delle dinamiche ad esso connesse, è andata via via aumentando, soprattutto alla luce delle problematiche relative all'analisi e alla gestione del rischio (Conway & Abrahamson, 1984; Birkeland, 2001), ai modelli di deposizione, scioglimento e deflusso idrico (i.e. Liston, 1998; Albert & Krajewski 1998; Jonas & Egli, 2010, DeBeer & Pomeroy, 2010) e al monitoraggio dei cambiamenti climatici sia per analisi di scenario (e.g. Lemke et al., 2007; Purdie et al., 2011; Viviroli et al., 2011) che

per ricerche applicate (i.e. idroelettrico: *Schaepli et al.*, 2007; conseguenze locali: *Yanling et al.*, 2008).

Sfortunatamente la morfologia della copertura nevosa e ancor più le dinamiche dell'acqua in essa contenuta sono tutt'ora difficilmente misurabili e prevedibili a causa della variabilità e non linearità dei fenomeni che le caratterizzano, quali, per esempio, il decorso meteorologico ed i fattori di versante (esposizione, pendenza).

Tale condizione rende quindi necessario l'utilizzo di strumenti veloci, affidabili ed accurati per la misura dei parametri nivologici della copertura, quali spessore, densità del manto e permittività apparente del mezzo in quanto direttamente connessi allo SWE che diventa elemento strategico di qualunque processo sopramenzionato.

L'utilizzo combinato di alte e basse frequenze per la misura della permittività è un'applicazione già nota per la determinazione indiretta della densità della neve (i.e. *Stein & Kane*, 1983; *Mätzler*, 1996; *Stacheder et al.*, 2005), e nuovi sensori per il monitoraggio su larga scala sono stati sviluppati da *Stähli et al.* 2004. La correlazione tra i parametri elettromagnetici misurati e i relativi valori di densità della neve (in condizione anidre) è effettuata attraverso l'applicazione di modelli empirici o fisicamente basati (i.e. *Looyenga*, 1965; *Kovacs et al.*, 1995).

Trascurando l'aspetto connesso alla misura dello spessore del manto nevoso per il quale si rimanda a numerosi studi ad esso relativi, per esempio, all'utilizzo del Ground Probing Radar (i.e.: *Annan et al.* 1995; *Marchand et al.*, 2001; *Pälli et al.*, 2002; *Godio*, 2009;), in questo studio vengono discussi i risultati di un esteso monitoraggio spaziale delle proprietà macro-fisiche della neve, effettuato con l'ausilio di tecnologia TDR (Time Domain Reflectometry), in un bacino d'alta quota (Breuil- Cervinia- 3000 m s.l.m.).

2 MATERIALI E METODI

2.1 Descrizione del sito

L'area di studio è ubicata nel comprensorio del Breuil (Cervinia), sulle Alpi italiane nord-occidentali. Tale comprensorio è destinato a uso turistico- ricreativo ed i pendii sono contraddistinti da una complessa morfologia causata dall'attività glaciale che ha generato profonde depressioni alternate a rilievi localizzati.

A causa della quota elevata (2500 – 3400 m. s.l.m.) e delle condizioni meteorologiche caratterizzate abitualmente da venti intensi, forte insolazione e temperature molto rigide, la copertura nevosa è diversificata da condizioni di spiccato metamorfismo, con elevata stratificazione in zone di accumulo e zone con neve fresca e croste superficiali.

Lo spessore medio del manto nevoso registrato a Lago Goillet (data set della stazione meteorologica localizzata in prossimità del lago nella parte bassa del bacino a 2526 m s.l.m.) nel periodo 1990-2005 ha registrato potenze variabili tra i pochi centimetri tipici dell'inizio di ottobre, fino a un valore massimo di circa 170-180 cm in marzo; nel mese di aprile il trend evidenzia una condizione stazionaria intorno ai 150 cm, mentre il processo di scioglimento inizia alla fine del mese sopracitato e vede una rapida diminuzione dello spessore del manto che continua per tutto il mese di maggio. La temperatura media invernale a questa quota nel trentennio considerato si è attestata intorno ai -5°C.

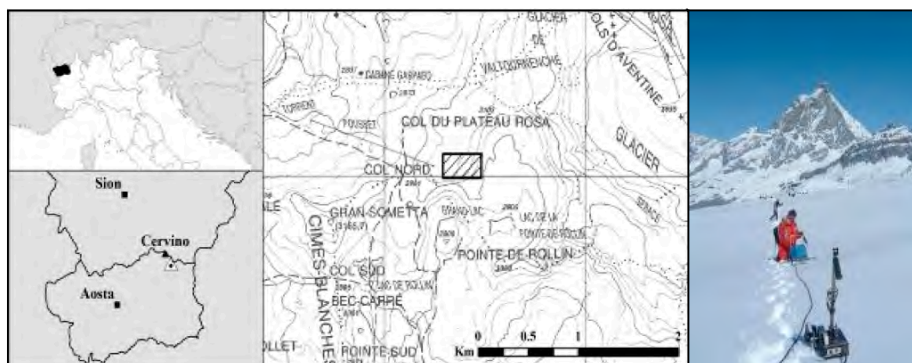


Figura 1. Sintesi cartografica dell'area del Cervino con evidenziata la zona di monitoraggio. Nella foto, una porzione del test-site di Cime Bianche durante una campagna di misura. Sullo sfondo il Monte Cervino - lato sud-est.

2.2 Strumentazione e rilievi

Le misure con tecnica TDR sono state effettuate all'interno dell'area di studio sopra evidenziata mediante un apparecchio TDR Tektronix 1502C collegato a un notebook per l'acquisizione computerizzata tramite software WinTDR (Or et al., 2004). Per il convogliamento del segnale nel mezzo poroso è stato utilizzato un kit di sonde a due aste metalliche (Fig.2) (e.g. Robinson, 2003). Tali sonde sono costituite da coppie di aste in acciaio INOX di 8 mm di diametro e lunghezza compresa tra i 500 e i 2000 mm, montate su distanziatori in nylon con interasse 8 cm in modo da rispettare il rapporto 1/10 consigliato da Knight, (1992). Tutti i cablaggi sono stati realizzati con cavo coassiale RG58 con impedenza 50 Ω , mentre per le connessioni al Tektronix 1502C sono stati impiegati connettori BNC in ottone nichelato. L'utilizzo di sonde a due aste metalliche parallele consente una minima perturbazione della neve e un buon volume di campionamento.



Figura 2. Strumentazione utilizzata nel rilievo: TDR cable tester TEKTRONIX 1502C e kit di sonde a due conduttori metallici paralleli di differente lunghezza.

Per quanto riguarda il campionamento verticale sono stati effettuati alcuni test di funzionamento compresi tra quota 3416 e 2729 m s.l.m. in cui le misure sono state acquisite tra la superficie della neve e, rispettivamente, 500, 1000 e 2000 mm di profondità nel manto nevoso, dopo di che si è proceduto con un campionamento speditivo attuato con sola sonda da 1200 mm finalizzato alla raccolta di un numero di punti di misura sufficiente per la spazializzazione del dato con tecniche geostatistiche. E' stato pertanto possibile realizzare un'indagine multivariata che ha consentito di spazializzare il dato acquisito interpolandolo con numerose variabili morfologiche (dedotte dal DTM a 2 metri ricampionato a 5 metri) quali quota, pendenza, esposizione, indice di cielo visibile, radiazione solare globale, curvatura del versante, effetto del vento.

La georeferenziazione di tutte le postazioni di misura è avvenuta tramite l'utilizzo di

apparecchiatura GPS impostata in coordinate UTM riferite a sistema ED 1950.

Il campionamento orizzontale ha invece preso in considerazione più profili nivologici, sia in zone di erosione che in zone di accumulo (legate al fenomeno della deflazione) posti a varie quote nel bacino. Le misure sono state acquisite dalla superficie all'interfaccia con il suolo, con sonde da 500 mm e cadenza ogni 20 mm alla miglior risoluzione ottenibile per ogni singola acquisizione. Tale campagna di misura è stata rivolta alla realizzazione di una curva di calibrazione per la misura della densità attraverso le misure manuali effettuate negli stessi punti.

3 RISULTATI

3.1 TDR e manto nevoso: ripetibilità della misura e curva di calibrazione

Le caratteristiche dielettriche della neve anidra presentano alcune analogie con quelle dell'aria (o anche del suolo secco), e la fragilità del mezzo poroso indagato esige alcuni accorgimenti atti a scongiurare il rischio di compattazione, il rischio di scioglimento in fase di misura e il rischio di misure falsate dalla presenza di vuoti d'aria. Tuttavia, il segnale TDR risulta nitido e chiaro, e la misura risulta ripetibile, nonostante si possano verificare difficoltà nella determinazione del punto di prima riflessione, corrispondente con l'ingresso del segnale nel mezzo poroso (Fig.3).

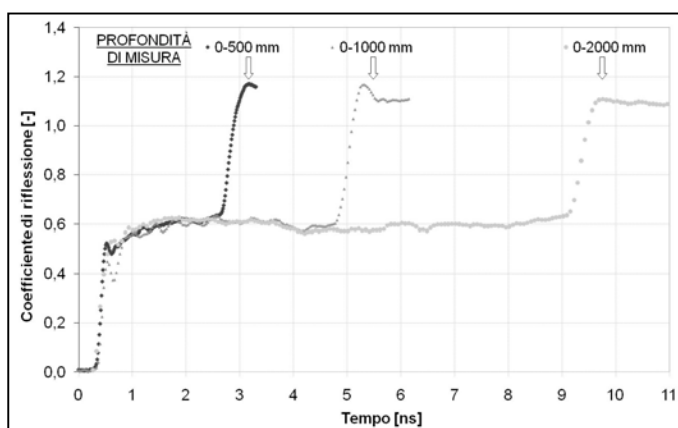


Figura 3. Esempio di curve TDR acquisite nel medesimo punto con sonde di differente lunghezza.

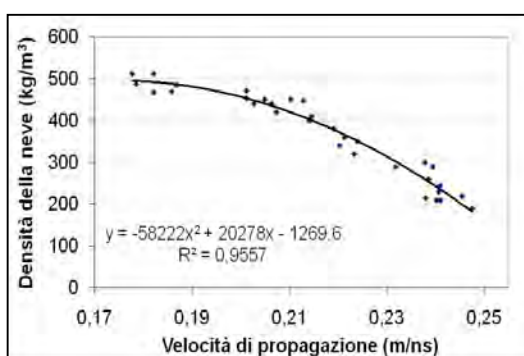


Figura 4. Correlazione tra valori di velocità di propagazione (misurati in profilo nivologico) con i relativi dati di densità misurati con metodo classico.

Entrando invece nello specifico della curva di calibrazione sono state realizzate misure orizzontali in profili nivologici con strati nevosi caratterizzati da densità significativamente differenti. La correlazione dei valori di velocità di propagazione del segnale TDR (Fig. 4) con i relativi dati di densità rilevati con metodo classico, evidenzia un andamento regolare con un elevatissimo coefficiente di determinazione (valore di $R^2 > 0.9$), indice di buona attendibilità del dato.

3.2 Mappatura della densità del manto nevoso

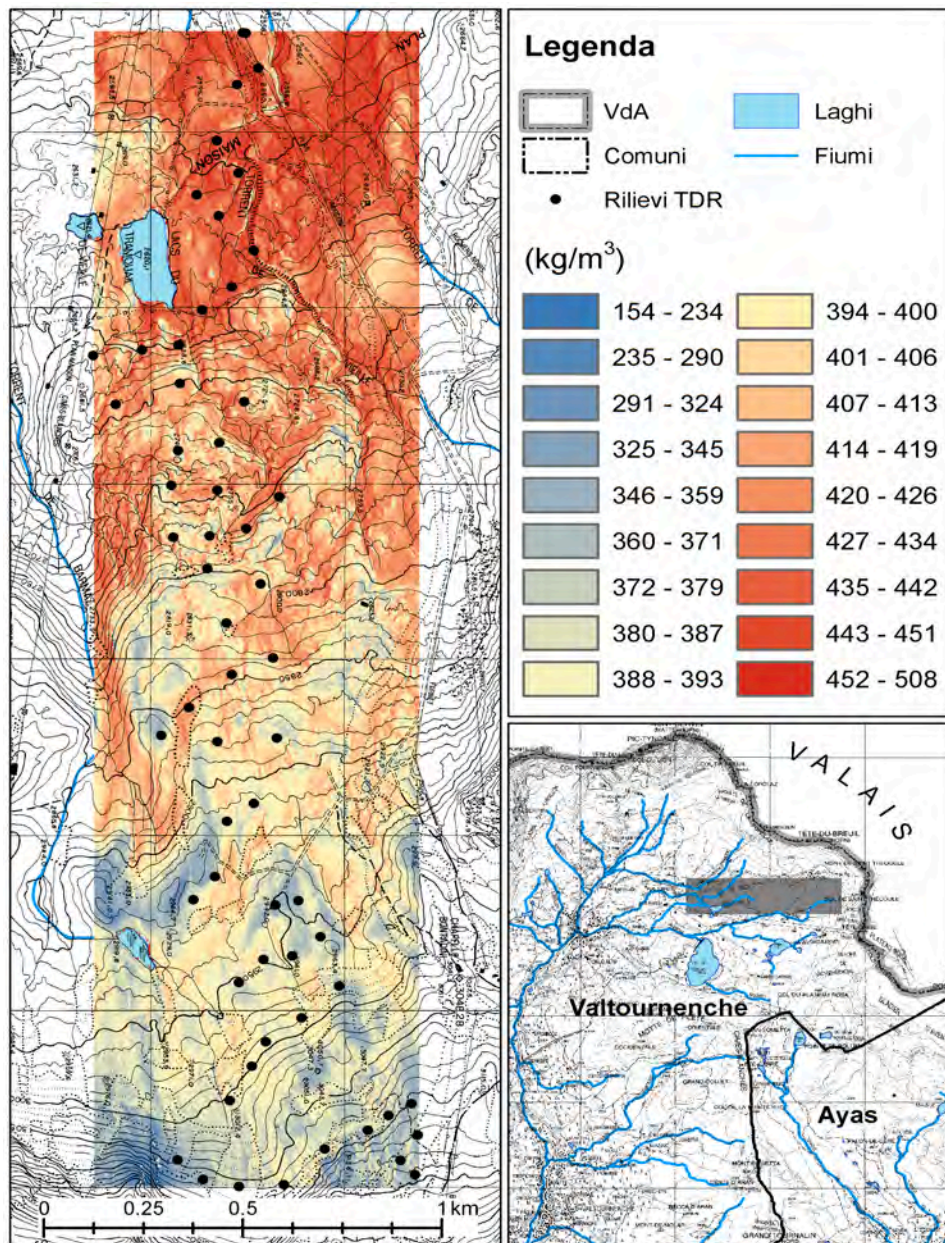


Figura 5. Mappa di densità della neve ricavata dall'analisi multivariata ottenuta interpolando i rilievi di campo con variabili topografiche dedotte dal DEM campionato con maglia 5x5 m.

A completamento dei test di monitoraggio puntuale per la verifica dell'accuratezza di misura TDR nel manto nevoso, è stato svolto un campionamento verticale con approccio speditivo, volto alla raccolta di dati spazializzati e finalizzato alla rappresentazione di un'analisi areale a scala di sottobacino. Sono stati quindi campionati, in 7 ore di lavoro, circa 60 punti di monitoraggio omogeneamente distribuiti nell'area di studio. Tale dato rappresenta già di per sé un interessantissimo risultato se si considera che, a parità di personale impiegato e di ore lavorate, il metodo classico consentirebbe il campionamento di un numero massimo di 3-5 profili nivologici.

La carta delle densità (Fig. 5) derivata dall'indagine TDR evidenzia un'interessante eterogeneità del manto nevoso con aree metamorfosate e ventate contrapposte ad altre meno perturbate e con densità medie più omogenee. Anche la progressiva diminuzione di quota evidenzia un progressivo incremento delle densità.

Tale tipo di monitoraggio, accoppiato con semplici misure di profondità (i.e. sonda manuale), o, per monitoraggi di dettaglio, con mappature di spessore del manto nevoso (i.e. GPR - Ground Probing Radar) può condurre a dettagliate stime di contenuto idrico equivalente per interi sottobacini, considerabili come strategiche per la pianificazione e la gestione della risorsa idrica nivoglaciale.

4 CONCLUSIONI

I test hanno evidenziato l'efficienza e l'efficacia dei sistemi TDR per la mappatura delle caratteristiche fisiche ed elettromagnetiche del manto nevoso. L'accuratezza del risultato rimane tuttavia subordinata alla possibilità di acquisizione di misure TDR di elevata qualità, per via della necessità di assoluta precisione nella determinazione dei punti di ingresso del segnale nella neve e di seconda riflessione.

Il campionamento orizzontale ha consentito la costruzione di un'apposita curva di calibrazione fra permittività del mezzo e densità della neve caratterizzata da un elevatissimo coefficiente di determinazione (valore di $R^2 > 0.9$)

Il campionamento con sonde verticali ha invece consentito di ottenere informazioni spazializzate indispensabili per l'ottenimento di un'informazione diretta di variabilità del manto nevoso a scala di bacino fino alla creazione di vere e proprie carte di densità del manto nevoso. Per via delle caratteristiche stesse della misura TDR, le misure effettuate con guide d'onda lunghe, pur presentando valori più accurati per via del minore errore relativo, forniscono un dato mediato degli strati misurati, dal quale non si riescono più ad ottenere informazioni quantitative dei singoli orizzonti attraversati. Tali informazioni, però, possono divenire fondamentali per numerose indagini scientifiche e pratiche, quali, a titolo esemplificativo e non esaustivo, stime accurate di contenuto idrico equivalente del manto nevoso anche con accumuli importanti e/o su grandi estensioni, implementazione di modelli di velocità 2D, conversione di immagini radar in sezioni di profondità, etc.

Ringraziamenti. Gli autori ringraziano per l'eccellente collaborazione scientifica la Fondazione Montagna Sicura, l'ARPA Valle d'Aosta e il Politecnico di Torino, nonché la Fondazione CRT per il supporto finanziario, la società d'impianti a fune Cervino S.p.a., il Comune di Valtournenche (AO) e la Società delle Guide del Cervino per il supporto logistico.

BIBLIOGRAFIA

- Albert, M., Krajewski, G. A fast, physically based point snowmelt model for use in distributed applications. *Hydrological Processes*, 1998, 12(10/11), 1809–1824.
- Annan, A.P., Cosway, S.W., Sigurdsson, T. GPR for snowpack water content, *Fifth International Conference on GPR*, Waterloo Centre for Groundwater Research, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1995, pp. 465–475.
- Birkeland, K.W. Spatial patterns of snow stability throughout a small mountain range, *J. Glaciol.* 2001, 47, 176–186.
- Conway, H., Abrahamson, J. Snow stability index, *J. Glaciol.*, 1984, 30, 321–327.
- DeBeer, C. M., Pomeroy, J. W. Simulation of the snowmelt runoff contributing area in a small alpine basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2010, 14, 1205–1219.
- Godio, A. Georadar measurements for snow cover density, *American Journal of Applied Sciences*, 2009, 6, 414-423.
- Jonas T., Egli, L. Snow distribution dynamics in an alpine catchment observed by repeated terrestrial laser scans: Implications for snow melt modeling; *AGU fall meeting*, 2010, San Francisco, USA, 13-17 Dec.
- Kovacs, A., Gow, A.J., Morey, R.M. The in-situ dielectric constant of polar firn revisited. *Cold Regions Science and Technology*, 1995, 23, 245-256.
- Knight, J.H. Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variation in soil water content. *Water Resour. Res.*, 1992, 28, 2345-2352
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H., Zhang, T. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground., Titel: Climate change 2007 : the physical science basis ; summary for policymakers, technical summary and frequently asked questions. Part of the Working Group I contribution to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by Susan Solomon, publ. for the Intergovernmental Panel on Climate Change Nairobi. UNEP, 2007, pp 337-383. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter4.pdf>
- Liston, G.E. Interrelationships among snow distribution, snowmelt, and snow cover depletion: Implications for atmospheric, hydrologic, and ecologic modeling. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 38, 1474-1487.
- Looyenga, H. Dielectric constant of heterogeneous mixtures. *Physica*, 1965, 31, 401-406.
- Marchand, W.D., Bruland, O., Killingtveit, A. Improved measurements and analysis of spatial snow cover by combining a ground based radar system with a differential global positioning system receiver. *Nordic Hydrology*, 2001, 32, 181–194.
- Mätzler, C. Microwave permittivity of dry snow. *IEEE Transactions Geosc. and Rem. Sens.*, 1996, 34, 573 – 581.
- Or, D., Jones, S.B., VanShaar, J.R., Hamphries, S., Koberstein, L. Users guide: WinTDR 6.1. Utah State Univ., Logan, 2004.
Available at <http://www.usu.edu/soilphysics/wintdr/documentation.cfm> (verified June 2011).
- Pälli, A., Kohler, J. C., Isaksson, E., Moore, J. C., Pinglot, J. F., Pohjola, V. A., Samuelsson, H. Spatial and temporal variability of snow accumulation using ground-penetrating radar and ice cores on a Svalbard glacier. *J. Glaciol.*, 2002, 48(162), 417–424.
- Purdie, H., Mackintosh, A., Lawson, W., Anderson B. Synoptic Influences on Snow Accumulation on Glaciers East and West of a Topographic Divide: Southern Alps, New Zealand. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2011, 43 (1), 82-94.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Or, D., Friedman, S.P. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry: simultaneous measurement of water content and bulk electrical conductivity in soils and porous media. *Vadose Zone J.*, 2003, 2, 444–475.

- Schaepli, B., Hingray, B., Musy, A. Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of potential impacts and related modeling uncertainties. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007, 11, 1191–1205.
- Stacheder, M.C., Huebner, S., Schlaeger, S., Brandelik, A. Combined TDR and low-frequency permittivity measurements for continuous snow wetness and snow density determination. In Kupfer, K. (Ed.): *Electromagnetic Aquametry*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005, pp. 367-382.
- Stähli, M., Stacheder, M., Gustafsson, D., Schlaeger, S., Schneebeli, M., Brandelik, A. A new in-situ sensor for large-scale snow cover monitoring. *Annals of Glaciology*, , 2004, 38, 273-278.
- Stein, J., Kane, D.L. Monitoring the unfrozen water content of soil and snow using time-domain reflectometry. *Water Resour. Res.*, 1983, 19, 1573–1584.
- Viviroli, D., Archer, D. R., Buytaert, W., Fowler, H. J., Greenwood, G. B., Hamlet, A. F., Huang, Y., Koboltschnig, G., Litaor, M. I., L'opez-Moreno, J. I., Lorentz, S., Schadler, B., Schwaiger, K., Vuille, M., Woods, R.. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and politics, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2011, 15, 471–504, doi:10.5194/hess-15-471.
- Yanling, C., Changchun, X., Yapeng, C., Zhongqin, L., Zhonghe, P. Response of snow cover to climate change in the periphery mountains of Tarim river basin, China, over the past four decades. *Annals of Glaciology*, 2008, 49, 166-172.