



Secondo interconfronto SWE

Santa Caterina Valfurva (SO)

3 Marzo 2016

Report tecnico a cura di ARPA Valle d'Aosta
(Gianluca Filippa, Umberto Morra di Cella, Fabrizio Diotri, Michel Isabellon)

In sintesi

- L'interconfronto 2015 (Pila, Valle d'Aosta) ha definito che la misura della densità del manto effettuata con il metodo SWE (campionamento orizzontale a strati regolari) e con il metodo AINEVA (campionamento orizzontale per strati riconosciuti soggettivamente) possono essere considerati EQUIVALENTI.
- OBIETTIVO dell'interconfronto 2016 è confrontare le misure di SWE effettuate con campionamento orizzontale in trincea e campionamento verticale tramite il tubo carotatore ENEL-VALTECNE (tuboEV).
- CAMPO FISSO: 184 misure di SWE effettuate con i due metodi su 4 cubi da 5 m di lato, 24 operatori nivologici coinvolti (fig. 1).
- RILIEVO ITINERANTE: 48 misure di SWE effettuate in 8 punti distribuiti in un'area eterogenea (campagna itinerante, fig 8).
- Una coppia di rilevatori (metodo SWE e Tubo EV) che effettua due misure successive di SWE su un manto nevoso nelle stesse condizioni e con lo stesso metodo commette un errore medio del 3% (fig. 4).
- Un gruppo di 12 coppie di rilevatori che effettua misure su 4 cubi omogenei commette un errore del 10% (fig. 4).
- I metodi SWE e tuboEV portano a risultati confrontabili
- In condizioni omogenee (hs variabile da 1.20 a 1.50 m, variabilità spaziale del manto nevoso pari al 7%), 3 punti di campionamento sono sufficienti a caratterizzare l'SWE dell'area sia con il metodo SWE sia con il metodo tuboEV (fig. 7).
- In condizioni eterogenee (hs variabile tra 0.80 e 1.40 m, variabilità spaziale dell'altezza del manto nevoso del 35%) 6 punti sono necessari per caratterizzare l'SWE dell'area con il metodo del tuboEV (fig.14)

1 Il campionamento

Il campionamento ha previsto due modalità differenti: a) una campagna basata su misure intensive effettuate entro un piano con manto piuttosto omogeneo, di seguito chiamata campagna stanziale; b) con una campagna itinerante su un percorso lungo il quale sono stati effettuati rilievi su 8 punti caratterizzati da HS (e quindi SWE) differenti. In entrambi i casi sono stati impiegati due metodi per la determinazione di SWE: il metodo denominato 'SWE' con campionamento orizzontale lungo un profilo per mezzo di tubo carotatore da 500 cc a profondità fisse; il metodo definito 'tuboEV', con campionamento verticale che consente il prelievo dell'intero manto nevoso e la determinazione di una massa volumica integrata.

2 La campagna stanziale

Numerosità campionaria

La campagna stanziale si è svolta intorno a 4 cubi di 5 metri di lato (denominati A, B, C, D). Le 12 coppie che hanno effettuato il campionamento hanno realizzato un totale di 184 misure, di cui 92 con il metodo SWE ed altrettante con il metodo tuboEV (Fig.1). All'interno di ogni coppia, gli operatori hanno effettuato 2 ripetizioni per ciascun metodo in ogni cubo (48 misure/cubo). Per il fatto che all'interno di ciascuna coppia sempre lo stesso operatore ha fatto la misura con il metodo SWE e col tuboEV è possibile testare anche la variabilità del singolo operatore. Tutte le coppie hanno effettuato misure nei cubi A-C, mentre nel cubo D solo 10 coppie hanno effettuato le misure.

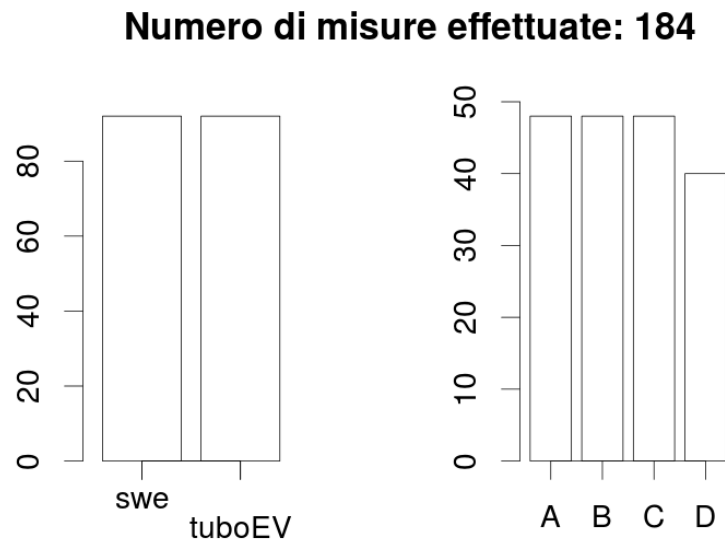


Figure 1: Numero di misure effettuate per ciascun metodo ed in ciascun cubo

Medie per metodo e per plot

La figura 2 mostra i valori mediani di SWE, HS e RHO per i due metodi. La mediana per un determinato metodo è quindi calcolata mediando le misure di tutte le coppie (incluse le ripetizioni) e di tutti i cubi. La barra di errore rappresenta la *mean absolute deviation* (MAD), parametro statistico concettualmente analogo alla deviazione standard. Si riporta inoltre il coefficiente di variazione, calcolato come rapporto tra MAD e mediana x 100. La linea rossa rappresenta la mediana generale che, ottenuta utilizzando tutti i dati misurati, rappresenta la migliore stima dell'SWE per quest'area (393 mm w. eq.) e sarà considerata nelle analisi successive come la verità a terra. L'SWE medio misurato col metodo tuboEV risulta leggermente superiore rispetto a quello misurato col metodo SWE. Inoltre, il tuboEV porta ad una variabilità maggiore (13%) rispetto al metodo SWE (7%).

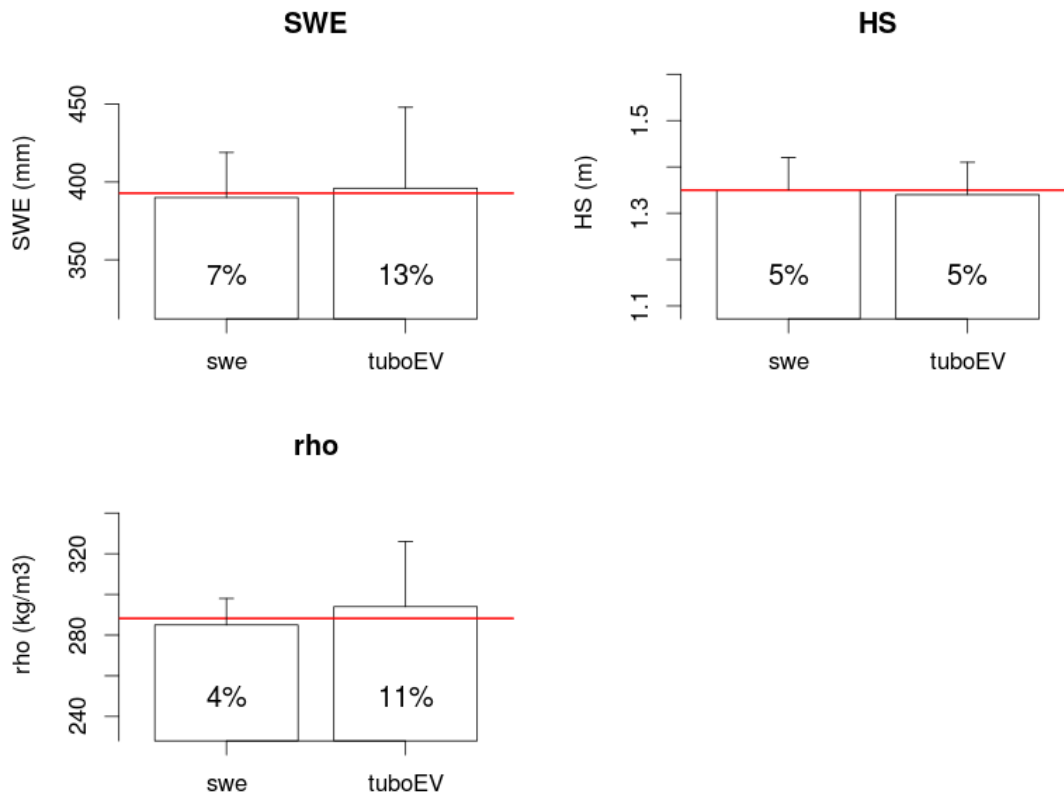


Figure 2: Valori mediani di SWE, HS e RHO in funzione del metodo utilizzato. La barra di errore rappresenta la *mean absolute deviation* (MAD). Si riporta inoltre il coefficiente di variazione, calcolato come $MAD/mediana * 100$. La linea rossa rappresenta la mediana generale (393 mm w. eq.).

La figura 3 è l'analogo di fig. 2 per la variabilità tra cubi per i quali si è registrata una differenza di SWE da 372 (cubo B) a 424 mm (cubo A).

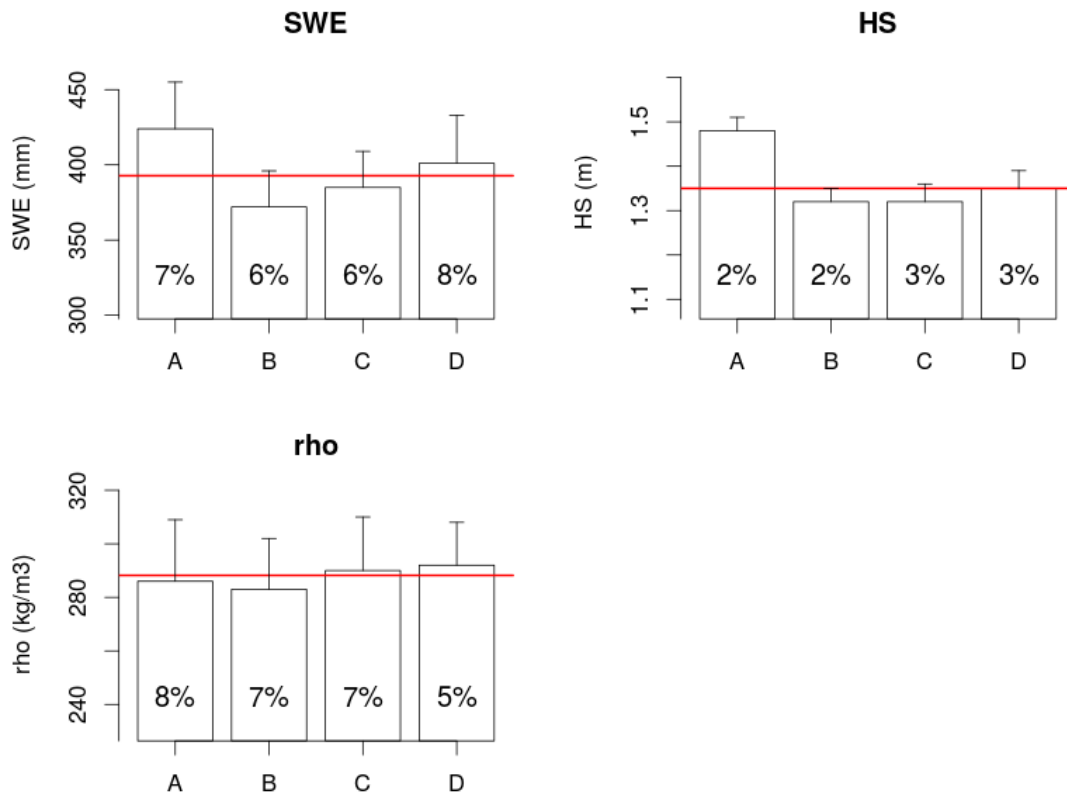


Figure 3: Valori mediani di SWE, HS e RHO nei 4 cubi. La barra di errore rappresenta la *mean absolute deviation* (MAD). Si riporta inoltre il coefficiente di variazione, calcolato come $MAD/mediana * 100$. La linea rossa rappresenta la mediana generale.

Errore associato ai fattori esaminati

Il disegno sperimentale proposto permette di valutare simultaneamente la variabilità dell'SWE associata a 4 diversi fattori: i) all'errore della coppia di operatori (operatore), ii) alla variabilità tra coppie di operatori (interoperatore), iii) allo spazio e iv) al metodo utilizzato. La figura 4 mostra qual è l'errore medio associato a ciascuna di queste fonti di variabilità. L'errore medio associato all'operatore è del 2.3%. Ciò indica che a parità di condizioni del manto nevoso e di metodo utilizzato lo stesso operatore "sbaglia", mediamente, del 2.3%, pari a 9 mm di w. eq.. La variabilità interoperatore rappresenta la fonte di errore maggiore, intorno al 10%. Essa indica la variabilità media tra osservazioni compiute da osservatori diversi nelle medesime condizioni e, pur mostrando valori relativamente bassi, è la fonte di variabilità maggiore dell'esperimento condotto.

La variabilità spaziale tra i cubi è del 7.4%. La variabilità legata al metodo è del 6.6%. Rispetto ai risultati dell'interconfronto SWE 2015, in cui le coppie erano distribuite lungo un transetto di 12-15 m, le condizioni per ciascun cubo sono più omogenee. Pertanto, l'errore del 10% tra operatori può essere considerato una vera stima della variabilità della misura da un operatore all'altro e non frutto di una trascurabile variabilità spaziale, come ipotizzato analizzando i dati 2015.

Fonte	mm SWE	%
Operatore	9	2.3%
Interoperatore	39	9.9%
Spaziale (plot)	29	7.4%
Metodo	26	6.6%

Figure 4: Errore percentuale medio associato a ciascuna delle tre fonti di variabilità

Variabilità tra metodi e spaziale

Per testare l'ipotesi che metodi diversi portino a differenze significative nella stima dell'SWE e che esista una variabilità spaziale significativa, è stato utilizzato un mixed model con metodo e plot (e la loro interazione) come fattori fissi e le coppie di misuratori come fattore random. Questo modello permette di separare le fonti di variabilità legate al metodo, allo spazio, interoperatore ed intraoperatore al fine di testare qual è l'effetto delle singole fonti di variabilità sulle misure medie di SWE. I risultati in figura 5 mostrano che la differenza tra SWE misurato coi due metodi, pur essendo contenuta, è statisticamente significativa. Analogamente mostra che esiste una differenza significativa anche tra i cubi. Il cubo A ha infatti un SWE medio superiore rispetto agli altri cubi.

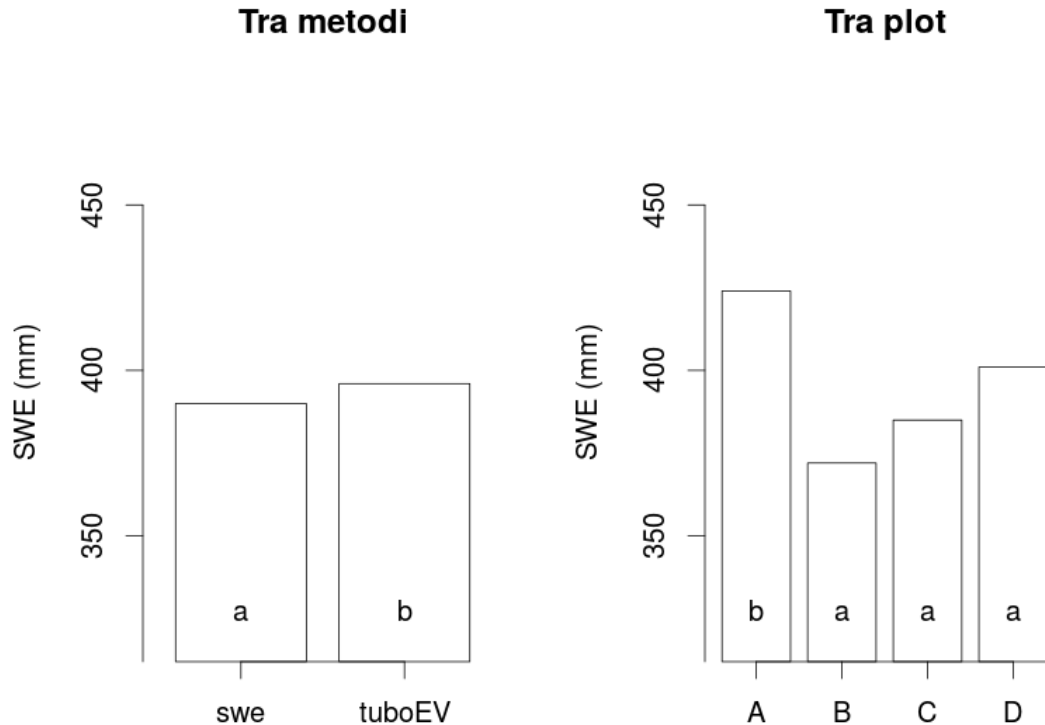


Figure 5: Risultati del modello statistico (mixed effect model). Le barre sono le stesse mostrate in fig. 2, mentre lettere diverse nella parte bassa della barra indicano differenze significative tra le medie

Appurato che i due metodi portano a risultati leggermente diversi tra loro, è interessante testare se le medie ottenute con ciascun metodo differiscano da un valore di riferimento che consideriamo verità a terra (393 mm SWE). La tabella seguente riporta il valore di significatività del t-test impiegato per verificare se i valori di SWE ottenuti con i tre metodi siano effettivamente diversi dalla verità a terra. La tabella in figura 6 riporta per entrambi i metodi valori superiori allo 0.05; si può pertanto concludere che entrambi i metodi consentono una stima corretta della verità a terra. Il fatto che il modello statistico porti a differenze significative è legato all'elevata omogeneità dei dati raccolti. In queste condizioni, infatti,

differenze anche minime combinate con il gran numero di misure raccolte possono portare a risultati statisticamente diversi.

method pValue	
swe	0.93
tuboEV	0.803

Figure 6: p-value del t-test utilizzato per confrontare le medie di SWE dai singoli metodi con la verità a terra. p-values inferiori a 0.05 indicano una differenza significativa

Esperimento di ricampionamento

Dai paragrafi precedenti emerge che: 1) entrambi i metodi sono validi e stimano correttamente la verità a terra e (2) la variabilità intraoperatore è bassa. Ai fini di tradurre l'esperienza di campo in protocolli operativi di campionamento è quindi lecito chiedersi: di quanto possiamo ridurre lo sforzo di campionamento (ridurre il numero di repliche e di coppie coinvolte) per conservare una adeguata confidenza nella stima della verità a terra? Abbiamo cercato di rispondere a questa domanda utilizzando una tecnica statistica di ricampionamento, cioè rimozione casuale di misure effettuate reiterata un numero adeguato di volte ed analisi dei risultati ottenuti per ciascuna. I risultati vengono poi sintetizzati in termini probabilistici.

In sintesi il procedimento è il seguente:

- si stabilisce un numero di misure da campionare,
- si campiona in modo casuale nel dataset completo (insieme di tutte le misure effettuate)

quel numero di misure un numero di volte m (con $m=1.000$),

- si esegue il t-test contro la verità a terra su ciascuno dei 1.000 sottocampioni,
- si stabilisce un criterio per cui il test statistico da un risultato buono (ad esempio $p(t)$ inferiore a 0.05),
- si conta quante volte il criterio è soddisfatto e lo si esprime in termini probabilistici sul numero m totale.

I risultati dell'analisi sono riportati in figura 7, nel grafico di sinistra. Sull'asse x è riportata la probabilità (%) di ottenere una media di swe uguale alla verità a terra. Sull'asse y è riportato il numero di campioni utilizzati di volta in volta per il calcolo della media. Il grafico rappresenta quindi come varia la probabilità di ottenere la verità a terra in funzione del numero di campioni raccolti. I colori diversi rappresentano i due metodi utilizzati e considerati separatamente. Se ci accontentiamo di una probabilità non inferiore al 95% (una soglia molto utilizzata in statistica, rappresentata dalla linea tratteggiata blu), 3 e 2 campioni sarebbero sufficienti rispettivamente col metodo tuboEV ed SWE per ottenere la stima corretta della verità a terra. In altre parole, se di fronte ad un campo neve come quello investigato durante la campagna decidessimo di eseguire due/tre campionamenti avremmo il 95% di probabilità di stimare correttamente l'swe dell'area.

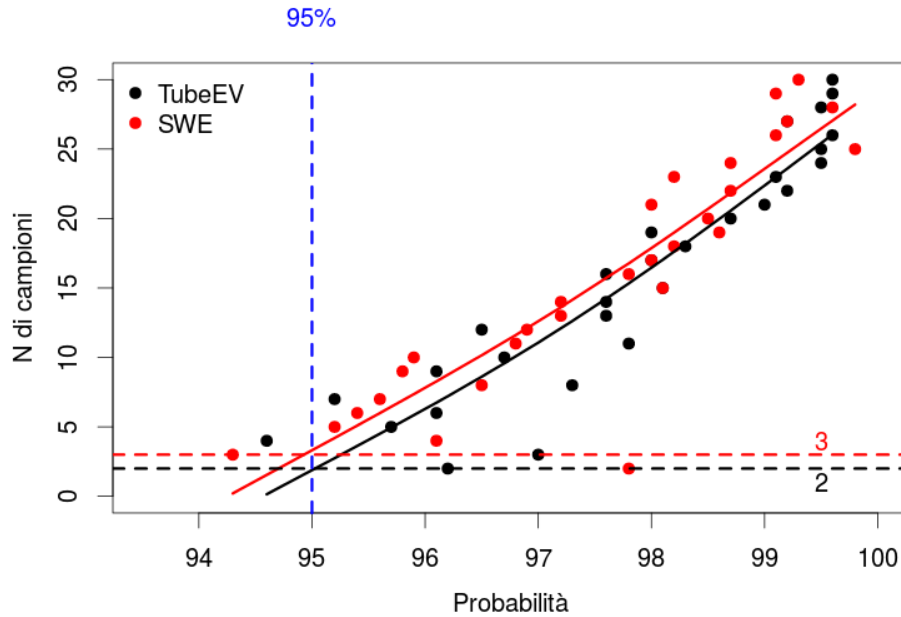


Figure 7: Risultati dell'analisi di ricampionamento. Variazione della probabilità di ottenere una stima corretta della verità a terra in funzione del numero dei campioni.

3 Campagna itinerante

Al fine di testare i due metodi in condizioni di SWE meno omogenee rispetto al campo neve, è stata realizzata la campagna itinerante. Essa ha previsto la misura di swe con i due metodi già descritti in precedenza. I campionamenti sono stati eseguiti su 8 punti: per ciascun punto è stato effettuato un profilo SWE e 5 misure ripetute con il tuboEV, in coerenza con quanto previsto dal protocollo ENEL. Le medie di SWE ottenute negli 8 punti sono riportate nel grafico in figura 8 come medie generali di tutti i punti. Come si vede (e come atteso), rispetto alla campagna stanziale la variabilità è molto più elevata. In analogia con la tabella in 2, è

stata calcolata la variabilità legata al metodo (10%, simile a quella della campagna stanziale) e la variabilità spaziale, che in questo caso ammonta al 34%. L'obiettivo di caratterizzare, con la campagna itinerante, un'area meno omogenea rispetto a quella del campo neve è stata raggiunta. Un dato in contrasto con i risultati della campagna stanziale è rappresentato dal fatto che il valore medio di SWE misurato col tuboEV è inferiore rispetto a quello misurato col metodo SWE, mentre nel campo neve stanziale si era verificato il fenomeno opposto.

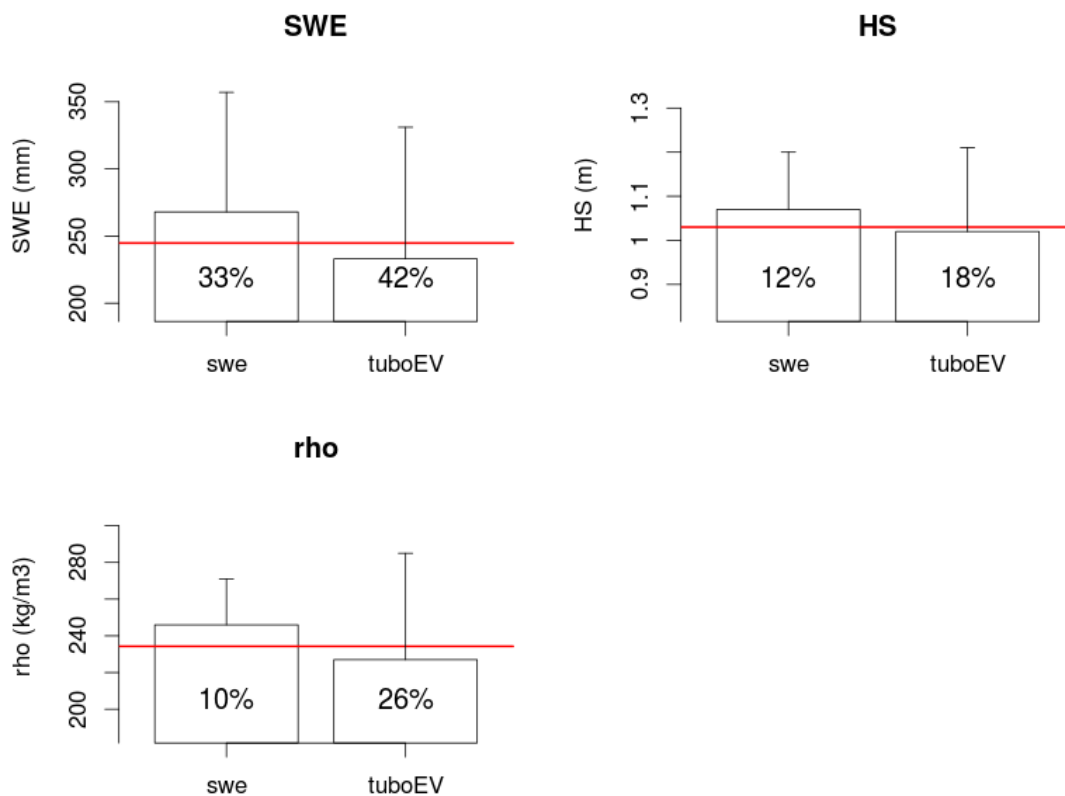


Figure 8: Valori mediani di SWE, HS e RHO in funzione del metodo utilizzato. La barra di errore rappresenta la mean absolute deviation (MAD). Si riporta inoltre il coefficiente di variazione, calcolato come $MAD/mediana * 100$. La linea rossa rappresenta la mediana generale.

Nel grafico in figura 9 si riportano gli SWE medi misurati in ciascuno degli 8 punti.

Oltre alle medie generali della campagna itinerante (linea orizzontale rossa), viene anche riportata la media delle misure del campo fisso (393 mm w. eq.) come riferimento (linea blu). Si osserva che quasi in ogni punto l'SWE della campagna itinerante è inferiore rispetto a quello del campo neve, poiché presumibilmente i punti itineranti rappresentano condizioni dove l'accumulo nevoso è meno favorito rispetto alla morfologia pianeggiante del campo neve stanziale. La variabilità tra i punti di SWE è legata sia a marcate differenze di HS, che varia da 0.86 ad 1.33 m, sia a significative differenze di densità, che varia da 170 a 300 kg/m³.

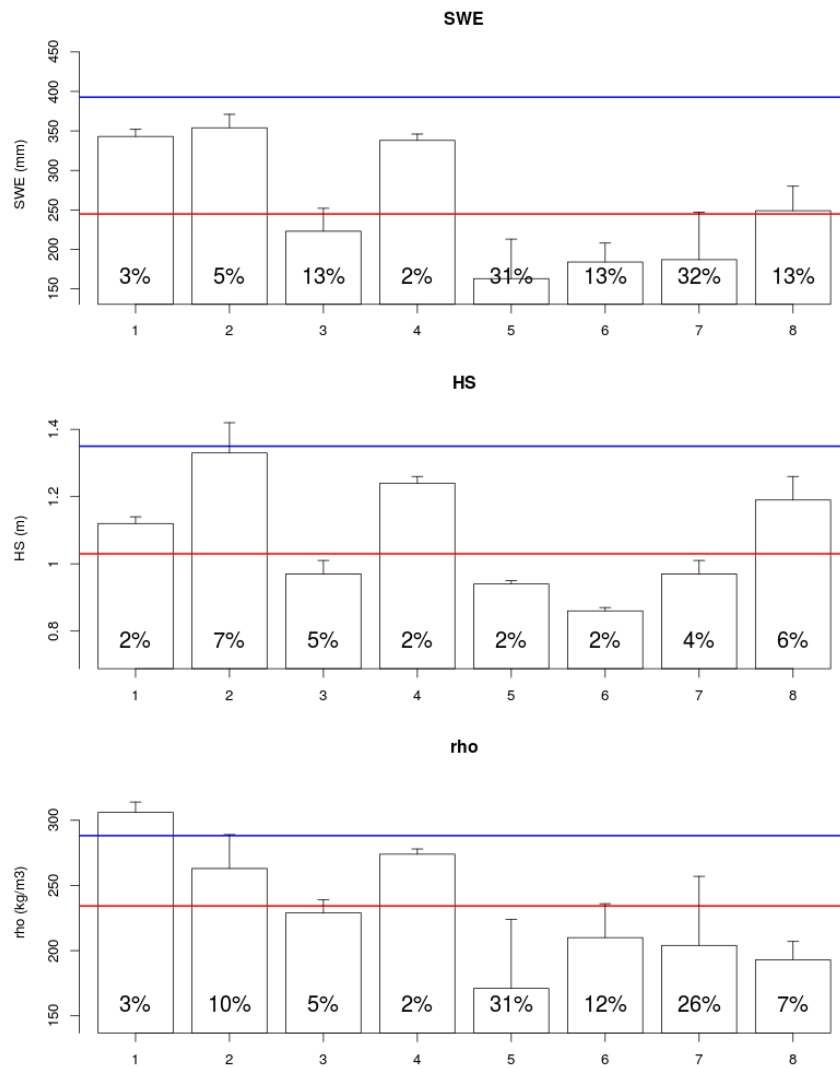


Figure 9: Valori mediani di SWE, HS e RHO in funzione del metodo utilizzato. La barra di errore rappresenta la mean absolute deviation (MAD). Si riporta inoltre il coefficiente di variazione, calcolato come $MAD/mediana * 100$. La linea rossa rappresenta la mediana generale. La linea blu rappresenta invece la media misurata nella campagna stanziale.

Anche sui dati della campagna itinerante è stata condotta l'analisi statistica che mostra ciò che è già evidente dall'analisi qualitativa degli istogrammi delle figure 8 e 9. Si osserva una differenza significativa tra i metodi, negli stessi punti, e tra i punti (fig. 10).

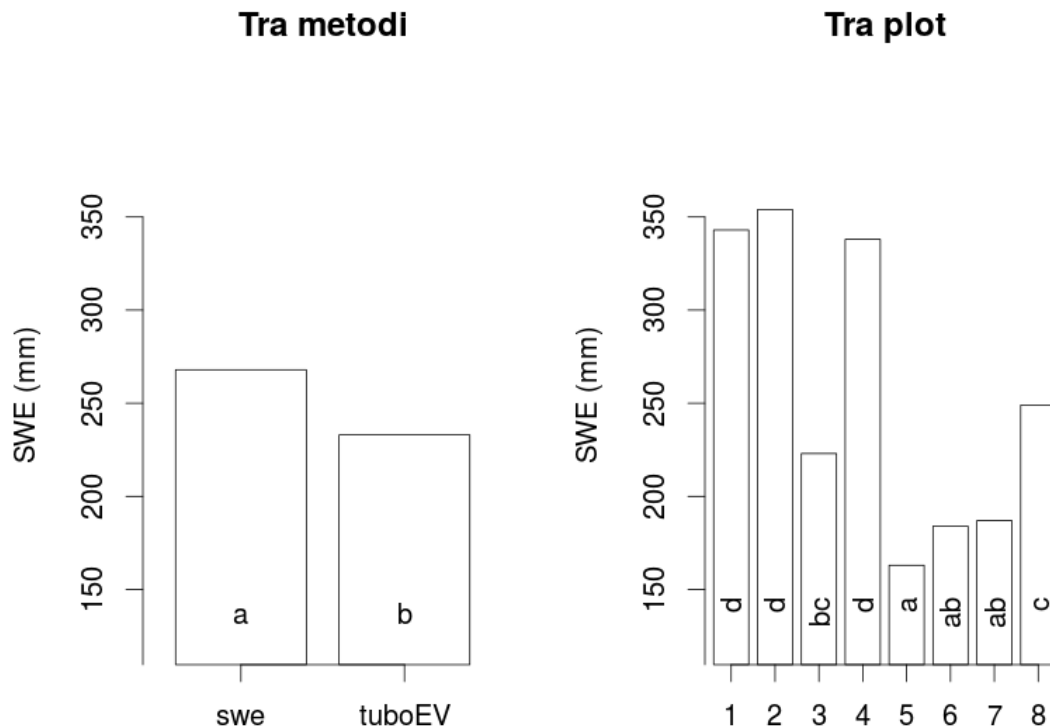


Figure 10: Risultati del modello statistico (mixed effect model). Le barre sono le stesse mostrate in fig. 8, mentre lettere diverse nella parte bassa della barra indicano differenze significative tra le medie

Esperimento di ricampionamento sulla campagna itinerante

In analogia con l'analisi condotta per la campagna stanziale, anche per la campagna itinerante è interessante comprendere qual sia il numero minimo di repliche per individuare in modo corretto la verità a terra.

In questo caso però dobbiamo tenere conto che i punti campionati mostrano notevoli differenze tra loro. Inoltre, in ciascun punto abbiamo repliche solo per il tuboEV, quindi l'analisi sarà limitata a questo metodo.

Consideriamo la necessità di quantificare SWE a scala di un piccolo versante sul quale abbiamo materializzato gli 8 punti di campionamento. La verità a terra sarà rappresentata dalla media di tutte le misure di SWE. In un terreno così eterogeneo, di quanti punti di campionamento avremo bisogno per quantificare correttamente la verità a terra?

Con un'analisi basata sul ricampionamento del tutto analoga a quella descritta per la campagna stanziale, abbiamo progressivamente ridotto il numero di punti campionati e calcolato la probabilità di caratterizzare correttamente la verità a terra. I risultati dell'analisi sono riportati in figura 11. Considerando sempre una soglia di affidabilità del 95%, osserviamo che con un numero di campioni uguale o maggiore a 6 siamo in grado di individuare correttamente la verità a terra. Ciò significa che se un operatore deve caratterizzare l'SWE di una zona relativamente eterogenea come quella della campagna itinerante, 6 campionamenti di tuboEV distribuiti casualmente sono sufficienti ad avere una probabilità intorno al 95% di caratterizzare correttamente l'SWE dell'area in esame.

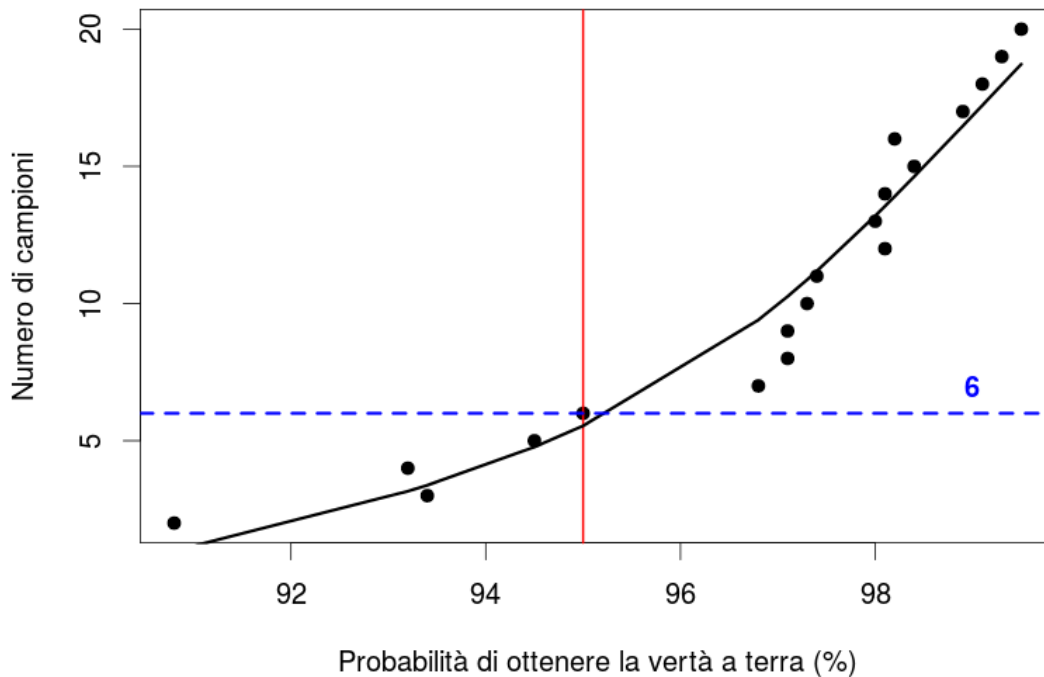


Figure 11: Risultati dell'analisi di ricampionamento. Variazione della probabilità di ottenere una stima corretta della verità a terra in funzione del numero dei campioni.

Tuttavia, grazie alla misura in 8 punti è stato possibile identificare condizioni nettamente diverse tra loro. Al fine di sfruttare al meglio questa informazione non consideriamo più gli 8 punti tutti insieme, ma come rappresentativi di condizioni differenti. In particolare, osservando ancora l'istogramma dell'SWE medio per punti, è possibile raggruppare i punti in tre gruppi caratterizzati da SWE diversi. Il grafico in figura 12 mostra il raggruppamento effettuato a posteriori. In figura 13 si riportano invece i valori medi di ciascun gruppo, con i risultati dell'analisi statistica che indica, come atteso, che le medie dei gruppi sono statisticamente differenti.

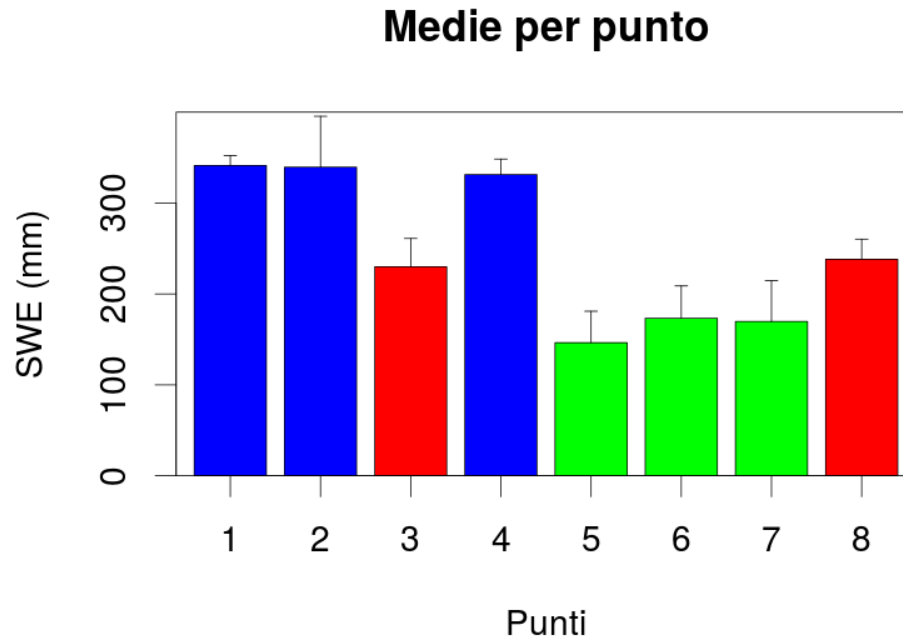


Figure 12: SWE medio negli 8 punti campionati durante la campagna itinerante. I colori indicano il raggruppamento dei punti caratterizzato da quantitativi di SWE simili effettuato a posteriori.

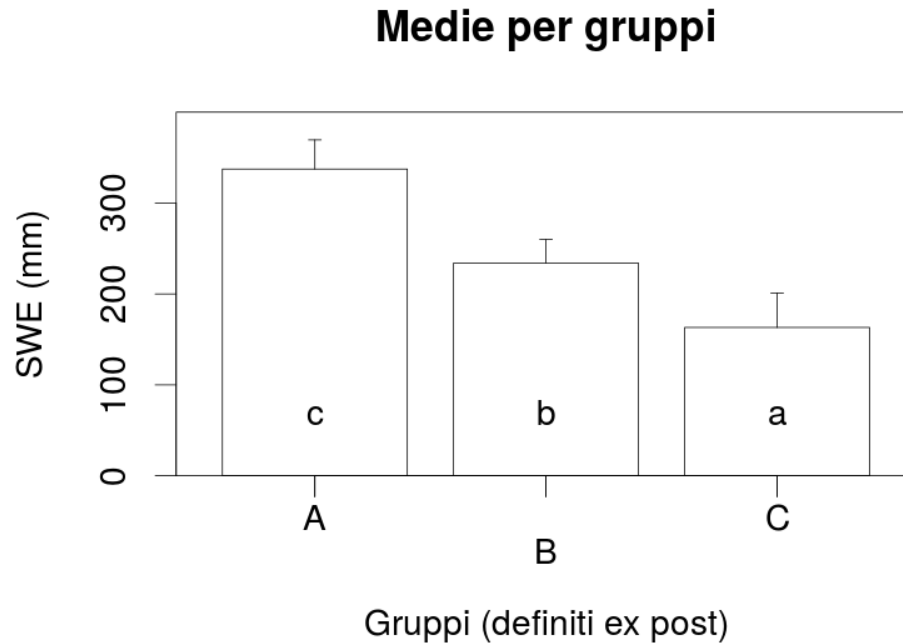


Figure 13: SWE medio dei 3 gruppi identificati sulla base dei risultati della campagna itinerante. Lettere diverse indicano differenze significative tra le medie.

E' stato quindi stabilito che gli otto punti del rilievo itinerante possono essere verosimilmente raggruppati in tre situazioni differenti. Ci si domanda a questo punto qual sia il numero di campioni per ciascun gruppo sufficiente a caratterizzare le differenze reciproche tra i gruppi. Si procede quindi con un esperimento di ricampionamento in cui si riduce progressivamente il numero di campioni per ciascun gruppo e si calcola la probabilità di mantenere le differenze reciproche tra gruppi. I risultati sono riportati in figura 14. Un numero di repliche per ciascun gruppo maggiore od uguale a 6 garantisce il 95% di probabilità di ottenere gli stessi risultati del modello completo.

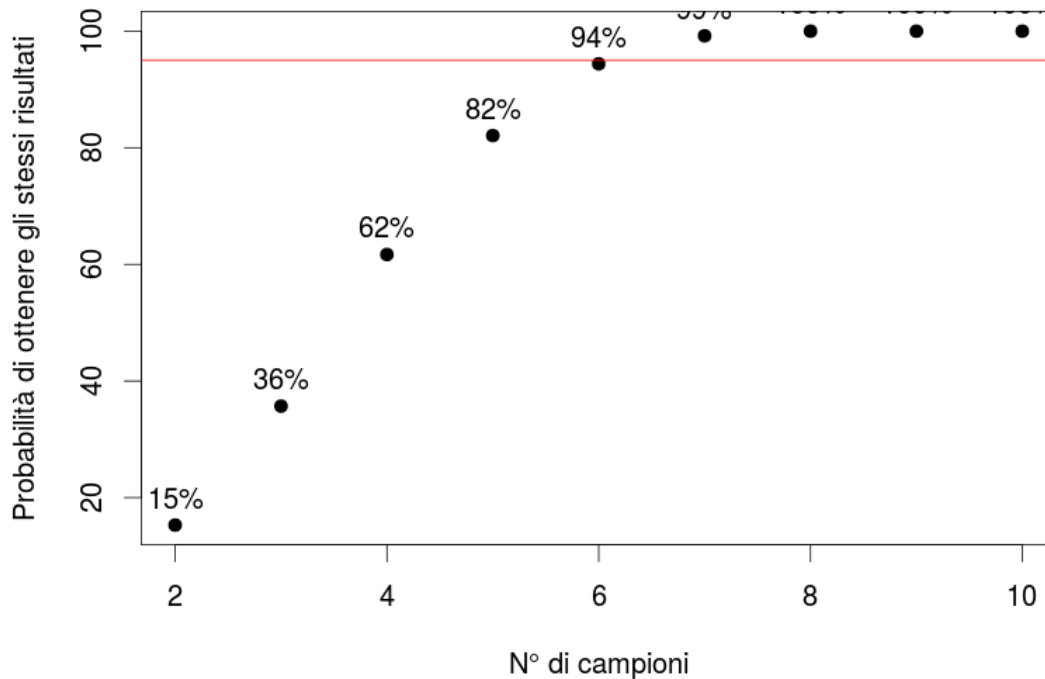


Figure 14: Variazione della probabilità di ottenere le stesse differenze reciproche tra i gruppi in funzione del numero di campioni per ciascun gruppo.

I risultati dell'analisi del ricampionamento suggeriscono alcune implicazioni pratiche ed operative sull'uso del tuboEV in condizioni di manto nevoso eterogeneo.

(1) Al fine di caratterizzare un'area relativamente eterogenea con altezza della neve compresa tra 80 e 130 cm senza voler discriminare situazioni differenti, è sufficiente campionare in modo casuale in almeno sei punti distinti.

(2) Con l'obiettivo di identificare situazioni differenti nell'area (ad esempio caratterizzare tre zone caratteristiche, una di accumulo, una di erosione ed una intermedia), è opportuno effettuare almeno sei campionamenti di tubo per ciascuna situazione. L'operatore potrebbe

in questo caso identificare situazioni diverse in termini di HS con un rilievo speditivo e successivamente individuare i punti in cui impiegare il carotatore verticale.

(3) In condizioni eterogenee, come quelle descritte, si suggerisce un numero ottimale di campioni di 6.

4 Conclusioni

In questa campagna di interconfronto sono state effettuate 184 misure su una superficie relativamente omogenea e subpianeggiante sfruttando i lati di 4 cubi di 5 metri di lato ciascuno. Inoltre, è stata condotta una campagna itinerante con 8 punti di campionamento distribuiti su un'area eterogenea (48 campioni in totale). Le misure sono state effettuate secondo due metodi diversi. I metodi utilizzati sono: campionamento orizzontale in trincea a profondità fisse (SWE), campionamento verticale con tubo carotatore ENEL-VALTECNE (tuboEV).

Gli obiettivi dell'interconfronto erano quelli di:

- i) valutare la variabilità nelle misure di un singolo operatore in condizioni controllate,
- ii) valutare la variabilità tra operatori in condizioni controllate,
- iii) valutare la variabilità tra metodi,
- iiii) valutare la performance ed il protocollo di campionamento del tuboEV in condizioni eterogenee.

Il metodo SWE e tuboEV portano ad una stima dell'equivalente in acqua del manto nevoso confrontabile.

In condizioni omogenee (hs variabile da 1.20 a 1.50 m, variabilità spaziale del 7%), 3 punti di campionamento sono sufficienti a caratterizzare l'SWE dell'area sia con il metodo SWE sia con il metodo tuboEV. In condizioni eterogenee (hs variabile tra 0.80 e 1.40 m, variabilità spaziale del 35%) 6 punti sono necessari per caratterizzare l'SWE dell'area con il metodo del tuboEV. Facendo precedere le misure con il tuboEV da un rilievo speditivo di HS, è possibile identificare subaree con dinamica di accumulo nevoso differente. Per ciascuna area, 6 campioni sono sufficienti a caratterizzare SWE.