

POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale



POLITECNICO
MILANO 1863

MODELLAZIONE DELLA FUSIONE
NIVALE IN AMBIENTE ALPINO

Relatore: Prof. Giovanni Ravazzani

Correlatore: Prof.ssa Chiara Corbari

Tesi di laurea di:

Eleonora Boscolo Matr. 928568

Anno accademico 2020/2021

Ringraziamenti

Ringrazio il prof. Giovanni Ravazzani e la professoressa Chiara Corbari per i preziosi consigli e l'Ufficio Meteorologico di Bolzano per aver fornito i dati utili allo studio.

Sono consapevole di essere una persona fortunata, perché un traguardo non si raggiunge senza un carburante energetico e costante. La mia fonte di energia è la mia famiglia. A tutti a partire dalle nonne rivolgo un grande, grandissimo abbraccio e un ringraziamento per esserci nella vita. Grazie alla mia sorellina Francy ed Angelo che mi hanno messo in condizione di lavorare ad un tavolo, senza dover scavalcare le montagne di cose che lascio in giro, grazie alle mie sorelle maggiori che mi hanno sempre incoraggiato a non mollare soprattutto nei momenti di sconforto, a Claudio e alla sua capacità di dirmi le cose giuste al momento giusto, al mio amore Angelo, di nome e di fatto per avermi sostenuta, coccolata, consolata e nutrita sulla base della dieta dell'umore, a papà che mi ha fornito ogni genere di libro, dall'Ingegneria ad Architettura, ai miei suoceri che mi hanno sempre sostenuto e invitato anche per i pranzi al volo durante le pause studio, ai miei amici che riscaldano la mia vita e alla mia Mimi: se ho raggiunto questo traguardo è grazie a te. Non ho dimenticato le risate durante la scrittura della prima tesi che ci siamo fatte e che hanno alleggerito le lunghe notti che abbiamo passato e non dimenticherò neanche questi lunghi intensi, ma spassosi pomeriggi. Un grandissimo grazie a Xalia, la mia insegnante di inglese, che con il suo garbo unico mi ha aiutato a sbloccare il mio inglese e a migliorarmi.

Sintesi

Lo studio riguarda la calibrazione del metodo ad Indice di Temperatura migliorato applicato sulla Provincia Autonoma di Bolzano, al fine di determinare l'equivalente idrico nivale (SWE) orario nell'intervallo di tempo 2016-2019.

Particolare attenzione è stata posta durante la fase di accumulo e fusione nivale, allo scopo di ottenere una valutazione giornaliera sulla disponibilità dell'acqua e la gestione delle risorse idriche.

Le stazioni distribuite sul territorio hanno provveduto a fornire i dati in ingresso al modello, quali temperatura, precipitazione e radiazione, e i dati osservati, altezza di neve, utili al confronto.

All'interno del modello è stato considerato anche l'influenza della morfologia locale (esposizione, ombreggiatura e quota), che determina il variare della radiazione che arriva al suolo.

In particolare, si è raffrontato l'approccio ad Indice di Temperatura migliorato con quello Degree-day (metodo grado-giorno già precedentemente tarato e convalidato), al fine di calibrarlo, per determinare in quali circostanze sia più utile il primo caso, piuttosto che il secondo.

Indice dei contenuti

MODELLAZIONE DELLA FUSIONE NIVALE IN AMBIENTE ALPINO.....	I
RINGRAZIAMENTI	I
SINTESI.....	III
INDICE DEI CONTENUTI	V
INDICE DELLE FIGURE.....	VII
INDICE DELLE TABELLE.....	IX
INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 CASO DI STUDIO	5
1.1 AREA DI STUDIO.....	5
1.2 CLIMA.....	6
1.3 TEMPERATURA	7
1.4 PRECIPITAZIONI	8
1.5 RETE DELLE STAZIONI DI MISURA E LE OSSERVAZIONI METEOROLOGICHE.....	9
CAPITOLO 2 MODELLAZIONE DELLA FUSIONE NIVALE	15
2.1 DESCRIZIONE DELLO SNOWMELT, METODI EMPIRICI, CONCETTUALI E FISICAMENTE BASATI ...	15
2.1.1 <i>Modelli fisicamente basati</i>	16
2.1.2 <i>Modelli empirici</i>	17
2.1.3 <i>Modelli concettuali</i>	17
2.2 METODO DAY-DEGREE E METODO AD INDICE DI TEMPERATURA MIGLIORATO	17
2.2.1 <i>Approccio ad Indice di Temperatura</i>	18
2.2.2 <i>Approccio Indice di Temperatura con termine radiativo</i>	22
2.3 INTERPOLAZIONE DEI DATI	24

2.3.1 Dati nivometrici	24
2.3.2 Dati Precipitazione.....	25
2.3.3 Dati Temperatura.....	26
2.3.4 Dati Radiazione	27
2.4 MODELLAZIONE DELLA RADIAZIONE	29
2.4.1 Radiazione solare.....	29
2.4.2 La radiazione a onde corte.....	31
2.4.3 La radiazione ad onde lunghe	39
2.4.4 Radiazione netta.....	40
CAPITOLO 3 CALIBRAZIONE	43
3.1 METODO AD INDICE DI TEMPERATURA BASE.....	43
3.2 METODO AD INDICE DI TEMPERATURA CON TERMINE RADIATIVO	44
3.2.1 Configurazione del modello.....	45
3.2.2 Risultati prima calibrazione.....	47
3.2.3 Risultati seconda Calibrazione Rado2.....	54
3.2.4 Analisi alla scala locale	63
3.2.5 Confronto SWE a livello globale.....	69
CONCLUSIONI.....	71
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	73

Indice delle figure

Figura 1.1 Provincia Autonoma di Bolzano.	6
Figura 1.2 Andamento della temperatura medio annuale	8
Figura 1.3 Rappresentazione generale delle stazioni di misura.	13
Figura 1.4 Rappresentazione distribuzione stazioni di misura	13
Figura 2.1 Rappresentazione sintetica degli approcci impiegati.	18
Figura 2.2 Schema del modello gradi giorno	19
Figura 2.3 Script del modello gradi giorno	20
Figura 2.4 Relazione tra le grandezze coinvolte dell'approccio ad Indice di Temperatura	21
Figura 2.5 Script del modello gradi giorno migliorato	23
Figura 2.6 Rappresentazione distribuzioni di stazioni di misura nivometriche.	25
Figura 2.7 Rappresentazione distribuzione stazioni di misura delle precipitazioni.	26
Figura 2.8 Rappresentazione distribuzione stazioni di misura di temperatura.	27
Figura 2.9 Rappresentazione distribuzione stazioni di misura radiometriche.	28
Figura 2.10 Intensità di emissione del corpo nero in funzione della lunghezza d'onda per varie temperature	29
Figura 2.11 Schema flussi radiativi scambiati tra Sole, Terra e Atmosfera	31
Figura 2.12 Identificazione della posizione del Sole lungo la traiettoria	32
Figura 2.13 Ripartizione della radiazione solare globale	34
Figura 2.14 Determinazione delle zone in ombra dovute all'intercettazione dei raggi solari data la presenza di rilievi	36
Figura 2.15 Angolo T formato dall'intersezione dalla direzione dei raggi solari con la perpendicolare alla superficie	37
Figura 3.1 Racines Malga Wasserfaller	48
Figura 3.2 Melago Monte Pratzen	48
Figura 3.3 Solda Maldriccio	49
Figura 3.4 Senales Teufelsegg	49
Figura 3.5 Rappresentazione dell'algoritmo che confronta i dati osservati con quelli simulati	51

Figura 3.6 Andamento stazione Curon Belpiano	55
Figura 3.7 Andamento stazione Casies Malga Pfinn	55
Figura 3.8 Andamento stazione Ultimo Pian dei Cavalli	56
Figura 3.9 Andamento stazione Alpe Cavallo	56
Figura 3.10 Andamento stazione Melago Monte Pratzen	57
Figura 3.11 Andamento stazione Solda Madriccio	57
Figura 3.12 Andamento stazione Senales Teufelsegg	58
Figura 3.13 Good index relazionato alle variabili esposizione e quota	61
Figura 3.14 Nuovi punti di indagine	64
Figura 3.15 Mappa di Esposizione	65
Figura 3.16 Mappa ombreggiamenti	65
Figura 3.17 Andamento SWE Punto 02 calcolato con Rado2 e tempo	67
Figura 3.18 Andamento SWE cumulato del Punto 02 calcolato con Rado2 e tempo	67
Figura 3.19 Andamento SWE cumulato del Punto 06 calcolato con Rado2 e tempo	68
Figura 3.20 Andamento SWE cumulato del Punto 06 calcolato con Rado2 e tempo	69
Figura 3.21 Andamento SWE cumulato, ordinato per area crescente	70

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 Identificazione delle stazioni impiegate sul territorio della Provincia Autonoma di Bolzano e relative informazioni raccolte.	12
Tabella 3.1 Tabella di contingenza risultati simulazione Rado1	53
Tabella 3.2 Good index della simulazione con e senza termine radiativo	54
Tabella 3.3 Tabella di contingenza della simulazione Rado2	58
Tabella 3.4 Good index confronto simulazione Rado2 e metodo day-degree	59
Tabella 3.5 Stazioni ordinate per quota e ripartite secondo l'esposizione	60
Tabella 3.6 Confronto risultati simulazioni con dati filtrati	62
Tabella 3.7 Confronto SWE cumulato per aree	70

INTRODUZIONE

Nevicata. La metamorfosi del mondo avviene in silenzio.

(Heinrich Wiesner)

Negli ultimi 50 anni, il miglioramento delle condizioni di vita umana insieme all'accrescimento demografico ha evidenziato un aumento di fabbisogno idrico. Se considerassimo la totalità di acqua presente sul pianeta Terra, questa richiesta potrebbe essere tranquillamente soddisfatta, sebbene solo una piccola parte di essa sia usufruibile per il consumo umano, industriale, uso agricolo e per impianti idroelettrici.

Di fatto, le montagne costituiscono parte del nostro sostentamento: durante la stagione invernale immagazzinano la neve e durante la stagione primaverile ed estiva ci riforniscono di acqua; inoltre, attraverso la fusione nivale, esse approvvigionano fiumi, laghi e i sistemi acquiferi.

Già da sole, queste ragioni sarebbero sufficienti per continuare a migliorare e sviluppare un modello di fusione nivale, al fine di determinare la disponibilità di

acqua, ma sarebbe inappropriato non citare un ulteriore fenomeno che sta influenzando il ciclo idrologico del pianeta terra, ossia il riscaldamento globale, le cui conseguenze portano ad un aumento inesorabile della temperatura, che a sua volta va ad intaccare la criosfera, costituita da terreni e rocce, permanentemente gelati (permafrost), coperture nevose e ghiacciai.

Questo processo viene tradotto in un'alterazione del ciclo accumulo e fusione stagionale dell'acqua trasportata fino a valle: con l'anticipo della fusione nivale potrebbe accadere che l'acqua si esaurisca nel momento di maggior richiesta, ovvero quando fa più caldo e la stagione delle piogge è ancora lontana.

Ecco, allora, la necessità di sviluppare e/o migliorare un modello che possa permettere una valutazione giornaliera, o con cadenza di qualche giorno, come supporto da applicare per diversi fini: disponibilità dell'acqua, gestione delle risorse idriche, opportunità di costruire a valle impianti idro-elettrici, valutazione dei rischi di alluvione, esecuzione di studi sull'impatto dei cambiamenti climatici.

Molteplici fini possono essere raggiunti, se le capacità di modellare l'accumulo e la fusione nivale vengono migliorate.

Tuttavia, vi sono alcuni ostacoli da considerare, come, per esempio, il fatto che le aree montuose hanno a disposizione una bassa densità di stazioni di misurazione rispetto ad aree vallive e, di conseguenza, la difficoltà nell'ottenere misure di dati osservati per poter convalidare i modelli idrologici. Inoltre, essendo lo studio effettuato su aree montuose, bisogna considerare la complessità della topografia del territorio e l'altitudine, aspetti che costituiscono un'ulteriore sfida per l'interpolazione delle variabili climatiche.

In passato e fino ad oggi, sono stati utilizzati molteplici metodi per il calcolo dell'accumulo e dello scioglimento nivale, tra essi il metodo ad indice di temperatura (Martinec, 1960) e il metodo a bilancio energetico (Ohmura 2001).

Differenti studi hanno discusso i vantaggi e gli svantaggi di questi metodi e rimane indiscusso che il metodo a bilancio energetico, un metodo fisicamente basato, sia l'approccio che descrive dettagliatamente ogni relazione dei fenomeni che intervengono nel processo e di conseguenza le variabili che entrano in gioco; allo stesso tempo, però, richiede requisiti di dati più elevati rispetto al metodo ad indice di temperatura, il quale viene maggiormente utilizzato proprio per la semplicità del modello: la relazione considera il legame tra la temperatura dell'aria, alla fase di precipitazione, e il tasso di scioglimento della neve, il quale è generalmente assunto costante nello spazio; tuttavia, sui terreni di montagna, vi è una variabilità spaziale data dagli effetti topografici, dalla pendenza, dall'ombreggiatura e dall'aspetto per cui gli studi effettuati da Hook nel 2003 ha prodotto un intervallo di valori. Inoltre, ulteriori studi sono stati effettuati con l'avvento di GIS e l'utilizzo di DTM, nei quali si è provato ad utilizzare modelli distribuiti estendendo la formulazione semplice ad Indice di Temperatura, che comprende il termine di radiazione (Kustas, 1994 e F. Casorzi e G. Dalla Fontana, 1996).

In questo studio verrà applicato l'approccio ad indice di temperatura migliorato, considerando la componente radiativa, soggetto a calibrazione, e l'area di studio coinciderà con la Provincia Autonoma di Bolzano.

CAPITOLO 1

CASO DI STUDIO

1.1 Area di studio

In questo capitolo viene presentata un'introduzione generale sulle caratteristiche idrogeologiche della provincia e della rete di stazioni di misura esistenti sul territorio.

L'area di studio riguarda l'intera Provincia Autonoma di Bolzano. Essa confina a Nord ed Est con l'Austria, a sud-est con il Veneto, a Sud con la provincia autonoma di Trento, a sud-ovest con la Lombardia e a Ovest con la Svizzera.

Il territorio si estende per circa 7.450 km² e l'area, come anche l'intera regione, è completamente montuosa con il gruppo Ortles-Cevedale, che raggiunge un'elevazione di 3.905 m e comprende innumerevoli valli, passi, laghi e fiumi che circondano l'intero territorio altoatesino come rappresentato in Figura 1.1.

A livello morfologico corrisponde al bacino superiore dell'Adige, ad esclusione dell'alta val Monastero che appartiene alla val Venosta, ed è separato da quello dell'Inn, grazie alla presenza delle Alpi Venoste, Breonie, Aurine e Pusteresi; mentre

il massiccio dell'Ortles-Cevedale lo dividono dal bacino del Piave e da quello superiore dell'Adda.

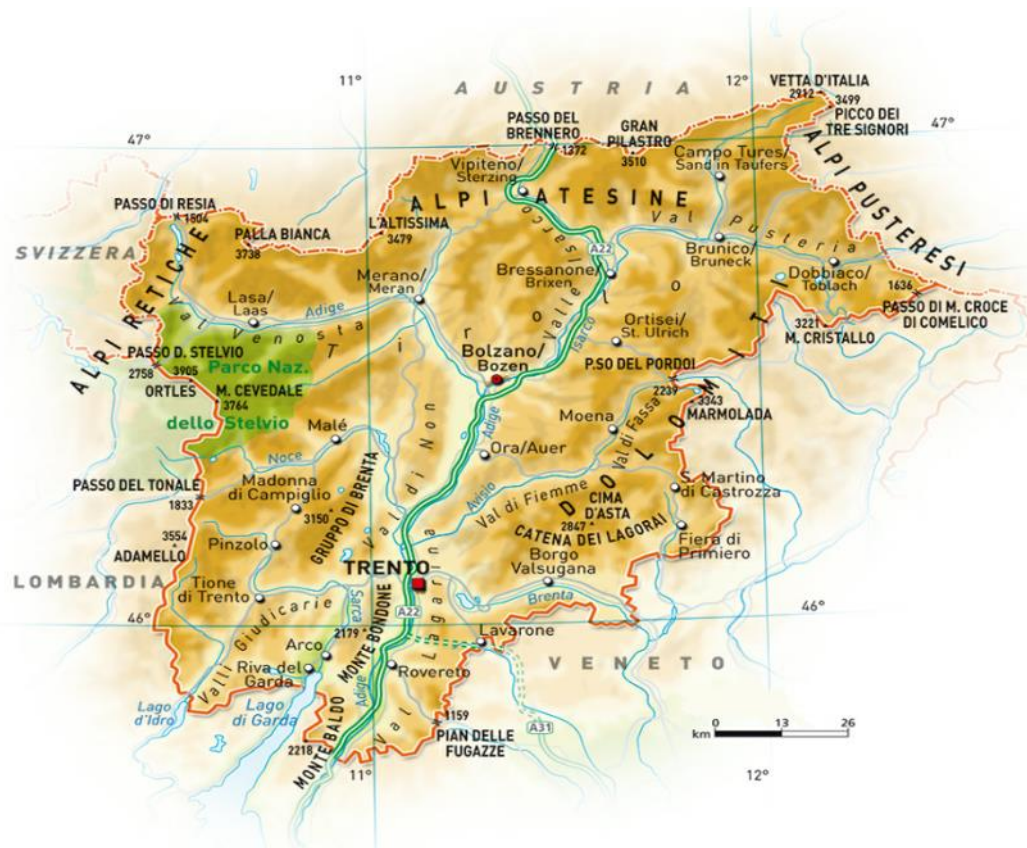


Figura 1.1 Provincia Autonoma di Bolzano.

1.2 Clima

Il clima ha caratteristiche alpine, tipiche dell'alta montagna. Il terreno complesso è esposto a venti predominanti, provenienti soprattutto da Nord-Est, durante l'inverno, e da venti meridionali, durante l'estate. Inoltre, vi è un'elevata escursione termica stagionale e giornaliera, tale da determinare inverni rigidi ed estati caldi. Da sottolineare anche la presenza del fenomeno del Föhn, che

determina l'aumento di temperatura durante l'estate, che raggiunge anche i 30-35°C nel fondovalle a Bolzano.

1.3 Temperatura

Le stazioni distribuite sul territorio forniscono dati di temperatura misurati ad un'altezza dal terreno pari a 2 m. La Temperatura è data dalla differenza tra la radiazione solare entrante, proveniente dal Sole, e quella uscente, emessa dalla Terra. Essa è influenzata dalla posizione del luogo di interesse, dalla stagione e dal tempo meteorologico.

Il servizio meteorologico altoatesino ha messo a disposizione tutti i dati raccolti negli anni e ciò ha permesso di identificare l'escursione termica massima, minima e media sull'intero territorio, evidenziando il divario che si può avere passando dalle quote basse a quelle più elevate, a seconda dei mesi e della stagione considerata, come dimostrato nella Figura 1.2.

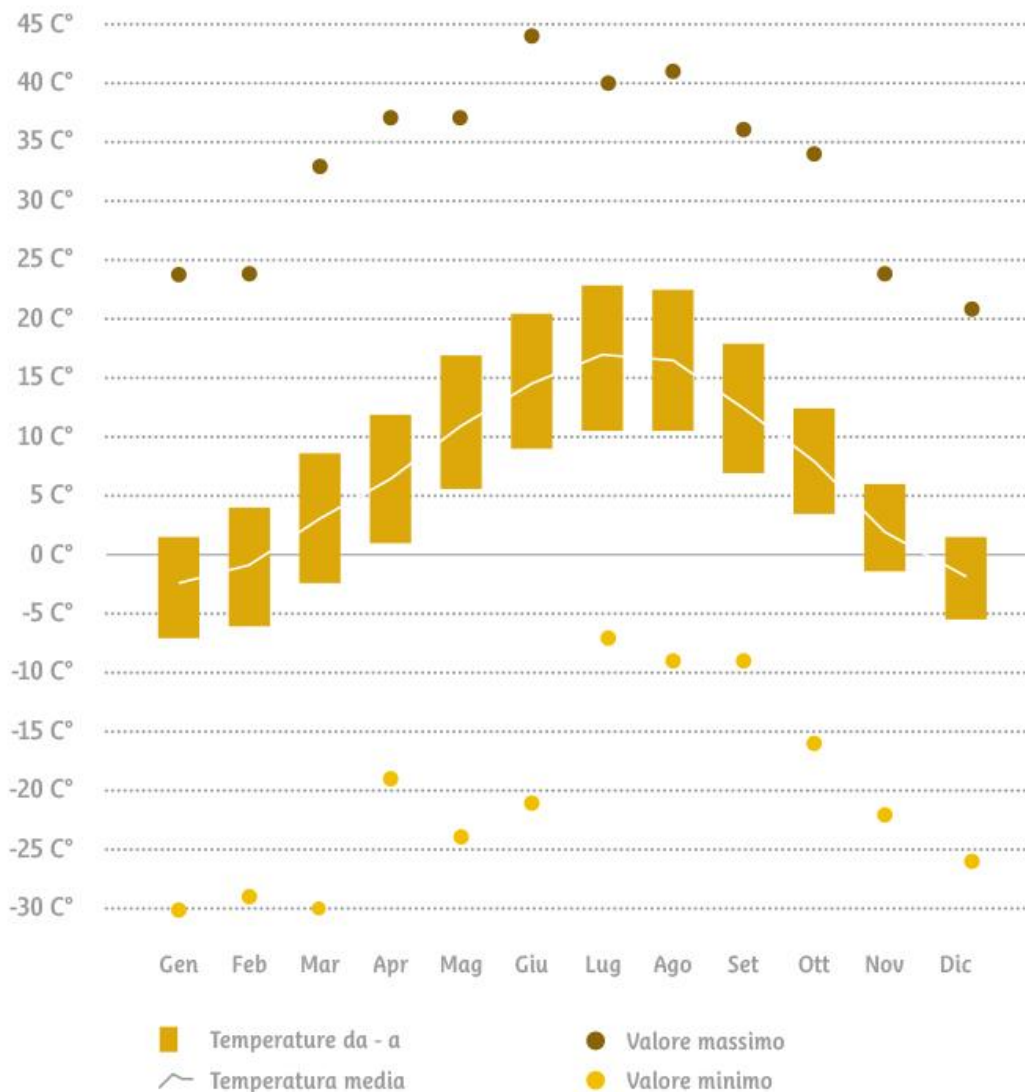


Figura 1.2 Andamento della temperatura medio annuale

1.4 Precipitazioni

Quota e orientamento dei rilievi influenzano le piogge: infatti, la presenza delle Alpi a Nord ed Est funge da barriera, determinando un apporto di precipitazioni inferiore ai 1.000 mm/anno. Esse non sono eccessive durante l'anno e sono distribuite diversamente a seconda della stagione: in inverno si registra la maggior parte di precipitazione solida sui rilievi, durante l'estate si ha il massimo di

piovosità sulle Dolomiti e sull'alto Adige. Nelle stagioni intermedie, si ha una precipitazione media tra le due.

La presenza della neve e il suo conseguente scioglimento condiziona il regime idrologico dei corsi d'acqua. Tale distribuzione stagionale delle piogge è dovuta alla relazione esistente tra conformazione del territorio e correnti di provenienza occidentale e meridionale, durante le stagioni intermedie e quella estiva, mentre le correnti da Nord ed Est apportano un clima più freddo.

1.5 Rete delle stazioni di misura e le osservazioni meteorologiche

Nell'area in esame è presente una rilevante quantità di stazioni di misura e - grazie all'ufficio Ufficio Meteorologia e prevenzione valanghe, il quale ha permesso l'accesso ai dati meteorologici alla pagina internet [Download dati | Meteo | Provincia autonoma di Bolzano-Alto Adige](#) - sono reperibili osservazioni quali: temperature e precipitazioni, giornaliere e mensili a seconda del luogo scelto; oltre che a dati relativi, quali, per esempio, velocità del vento, umidità, radiazione, pressione atmosferica.

Le stazioni coprono il territorio in maniera uniforme ad un'altitudine compresa tra i 212 m e 3.399 m, ma solo alcune postazioni provvedono a fornire tutti i dati necessari utili al calcolo dello scioglimento e, per di più, sono poche le stazioni che raccolgono i dati misurati dell'altezza di neve per il confronto.

Per il calcolo dello scioglimento nivale e le simulazioni ad esso collegate, i dati richiesti come input sono: precipitazioni, temperatura e dati di radiazione.

In generale è difficile avere serie storiche continue delle variabili che entrano in gioco nel modello e dati disponibili provenienti dalla stessa stazione, tuttavia, in

questo caso, la situazione è stata favorevole, poiché la quantità di strumenti radiometrici, distribuiti alle diverse quote, insieme alle altre informazioni è risultata sufficiente per eseguire le simulazioni.

Sul territorio, come si può evincere dalla

Tabella 1.1 sono a disposizione:

- 21 stazioni per la misura dell'altezza della neve all'interno di un range di altitudine compreso tra 1.900 e 3.000 m;
- 43 stazioni per la misura di radiazioni al suolo;
- 48 stazioni per la misura dei dati di precipitazione;
- 81 stazioni per la misura di temperatura;

Stazioni	n.	Latitudine	Longitudine	Quota	N	R	T	P
Abtei_Piz_La_Illa_Badia_Piz_La_Illa	1	722543	5160892	2050	x		x	
Abtei_Piz_Pisciadù_Badia_Cima_Pisciadù	2	716635	5156974	2985			x	
Antholz_Obertal_Anterselva_di_Sopra	3	737507	5195474	1320		x	x	x
Auer_Ora	4	677362	5135172	250		x	x	x
Barbian_Kollmann_Barbiano_Colma	5	693721	5163281	490		x	x	x
Bozen_Bolzano	6	677049	5150190	254		x	x	x
Branzoll_Bronzolo	7	678049	5141807	226		x	x	x
Brixen_Vahrn_Bressanone	8	702029	5178611	590		x	x	x
Bruneck_Brunico	9	723674	5187588	828		x	x	x
Deutschnofen_Obereggen_Nova_Ponente_Obereggen	10	695896	5137569	2125	x		x	
Deutschnofen_Nova_Ponente	11	686486	5143630	1470		x	x	x
Franzensfeste_Grasstein_Fortezza_Le_Cave	12	694445	5187499	850			x	x
Gargazon_Gargazzone	13	668633	5160508	290		x	x	x
Graun_Schöneben_Curon_Belpiano	14	614326	5184760	2040	x		x	
Gsies_Pfinnacle_Casies_Malga_Pfinnacle	15	744722	5192575	2152	x		x	
Gsies_Regelspitze_Casies_Cima_Regola	16	743952	5194145	2747			x	
Hintermartell_Alta_Val_Martello	17	632465	5152929	1720		x	x	x
Jaufenkamm_Cresta_del_Giovo	18	676779	5190080	2145			x	
Jenesien_San_Genesio	19	679299	5155691	970		x	x	x
Kaltern_Oberplanitzing_Caldaro_Pianizza_di_Sopra	20	673022	5145662	495		x	x	x
Laas_-_Eys_Lasa_-_Oris	21	626285	5164800	874		x	x	x
Ladurns_Ladurns	22	680117	5200634	1960	x		x	
Laimburg_Laimburg	23	675993	5138689	224		x	x	x
Laurein_Clozner_Loch_Lauregno_Clozner_Loch	24	655593	5153087	2165	x		x	
Marienberg_Monte_Maria	25	616288	5173583	1310		x	x	x
Melag_Pratznerberg_Melago_Monte_Pratzen	26	623874	5189422	2450	x		x	
Meran_Merano	27	663374	5172717	330		x	x	x
Mühlwald_Selva_dei_Molini	28	718972	5196967	1141			x	x
Naturns_Naturno	29	652371	5167937	541		x	x	x
Obervintl_Vandoies	30	710057	5187849	746		x	x	
Pens_Tramintal_Pennes_Val_Tramin	31	689061	5185368	2100	x		x	
Pens_Pennes	32	684309	5183531	1450			x	x
Pfelders_Grünboden_Prati_di_Plan	33	660393	5184194	2015	x		x	
Pfelders_Rauhjoch_Monte_Scablo_di_Plan	34	661276	5188319	2926			x	
Pfelders_Plan	35	659362	5184669	1618		x	x	x
Pfitsch_St._Jakob_Val_di_Vizze_San_Giacomo	36	697647	5204620	1440		x	x	x
Pfunders_Dannelspitz_Fundres_Punta_di_Dan	37	704501	5202375	2808			x	
Pfunders_Stutzenalm_Fundres_Malga_Stutzen	38	704653	5200382	2050	x		x	
Plose_Plose	39	709003	5175305	2472		x	x	
Prags_Rossalm_Braies_Alpe_Cavallo	40	737994	5173329	2340	x		x	
Prettau_Merbalm_Predoi_Malga_Merbe	41	737193	5213916	2006	x		x	
Prettau_Predoi	42	735444	5213892	1450		x	x	x
Ratschings_Wasserfaller_Alm_Racines_Malga_Wasserfaller	43	675262	5190572	1907	x		x	
Rein_in_Taufers_Riva_di_Tures	44	734591	5203425	1562		x	x	x
Ridnaun_Ridanna	45	675668	5197644	1364			x	x
Rittnerhorn_Corno_del_Renon	46	688384	5165385	2260			x	
Salurn_Salorno	47	668504	5122617	212		x	x	x

Stazioni	n.	Latitudine	Longitudine	Quota	N	R	T	P
Sand_i.T._Mühlen_Campo_Tures_Molini	48	724491	5198298	851	x	x	x	
Sarnthein_Sarentino	49	680239	5167924	970	x	x	x	
Schlanders_Silandro	50	636292	5164894	698	x	x	x	
Schnals_Finail_Senales_Finale	51	639220	5178015	1950	x		x	
Schnals_Teufelsegg_Senales_Teufelsegg	52	634696	5182751	3035	x		x	
Schnals_Vernagt_Senales_Vernago	53	641283	5177450	1700			x	x
Seiser_Alm_Zallinger_Alpe_di_Siusi_Zallinger	54	706267	5154436	2055	x	x	x	x
Sexten_Rotwandwiesen_Sesto_Prati_di_Croda_Rossa	55	757830	5173296	1910	x		x	
Signalgipfel_Wilder_Freiger_Anticima_Cima_Libera	56	666809	5203984	3399			x	
St._Magdalena_in_Gsies_S._Maddalena_in_Casies	57	747278	5191964	1412	x	x	x	
St._Martin_in_Passeier_S._Martino_in_Passiria	58	670189	5183398	586	x	x	x	
St._Martin_in_Thurn_S._Martino_in_Badia	59	721627	5173593	1150	x	x	x	
St._Valentin_a.d._Haide_S._Valentino_alla_Muta	60	616720	5181393	1499	x	x	x	
St._Veit_in_Prags_S._Vito_di_Braies	61	736938	5177815	1350			x	x
St._Walburg_S._Valburga	62	652588	5156180	1142	x	x	x	
Sterzing_Vipiteno	63	685786	5195277	943	x	x	x	
Sulden_Madritsch_Solda_Madriccio	64	623901	5150187	2825	x		x	
Sulden_Schöntaufspitze_Solda_Cima_Beltovo	65	624957	5151212	3328			x	
Sulden_Solda	66	622375	5152632	1905	x	x	x	
Taufers_i.M._Tubre	67	611860	5165895	1235	x	x	x	
Terenten_Terento	68	712423	5190536	1349	x	x	x	
Timmelsalm_Alpe_del_Tumulo	69	663615	5197801	2230	x		x	
Toblach_Hochebenkofel_Dobbiaco_Cima_Piatta_Alta	70	749101	5174778	2906			x	
Toblach_Dobbiaco	71	745961	5180192	1219	x	x	x	
Trafoi_Zaufenkofel_Trafoi_Zaufenkofel	72	618025	5156931	2475			x	
Ulten_Rosbänke_Ultimo_Pian_dei_Cavalli	73	639686	5147806	2255	x		x	
Ulten_Weißbrunn_Ultimo_Fontana_Bianca	74	640591	5149772	1900	x	x	x	
Ulten_Weißbrunnspitz_Ultimo_Cima_di_Fontana_Bianca	75	636135	5150463	3253			x	
Vals_Valles	76	700296	5191661	1410	x	x	x	
Völs_am_Schlern_Fie'_allo_Sciliar	77	692801	5154116	835	x	x	x	
Weissenbach_Fadner_Alm_Rio_Bianco_Malga_Fadner	78	717838	5200867	2155	x		x	
Welsberg_Monguelfo	79	739010	5181375	1131	x	x	x	
Welschnofen_Nova_Levante	80	695551	5144827	1128	x	x	x	
Wolkenstein_Selva_di_V._Gardena	81	712245	5158389	1594			x	x

Tabella 1.1 Identificazione delle stazioni impiegate sul territorio della Provincia Autonoma di Bolzano e relative informazioni raccolte.

Per evidenziare il tipo di informazione raccolta, è stata elaborata la mappa, inserita nella Figura 1.4, con tutte le stazioni utilizzate nelle simulazioni.

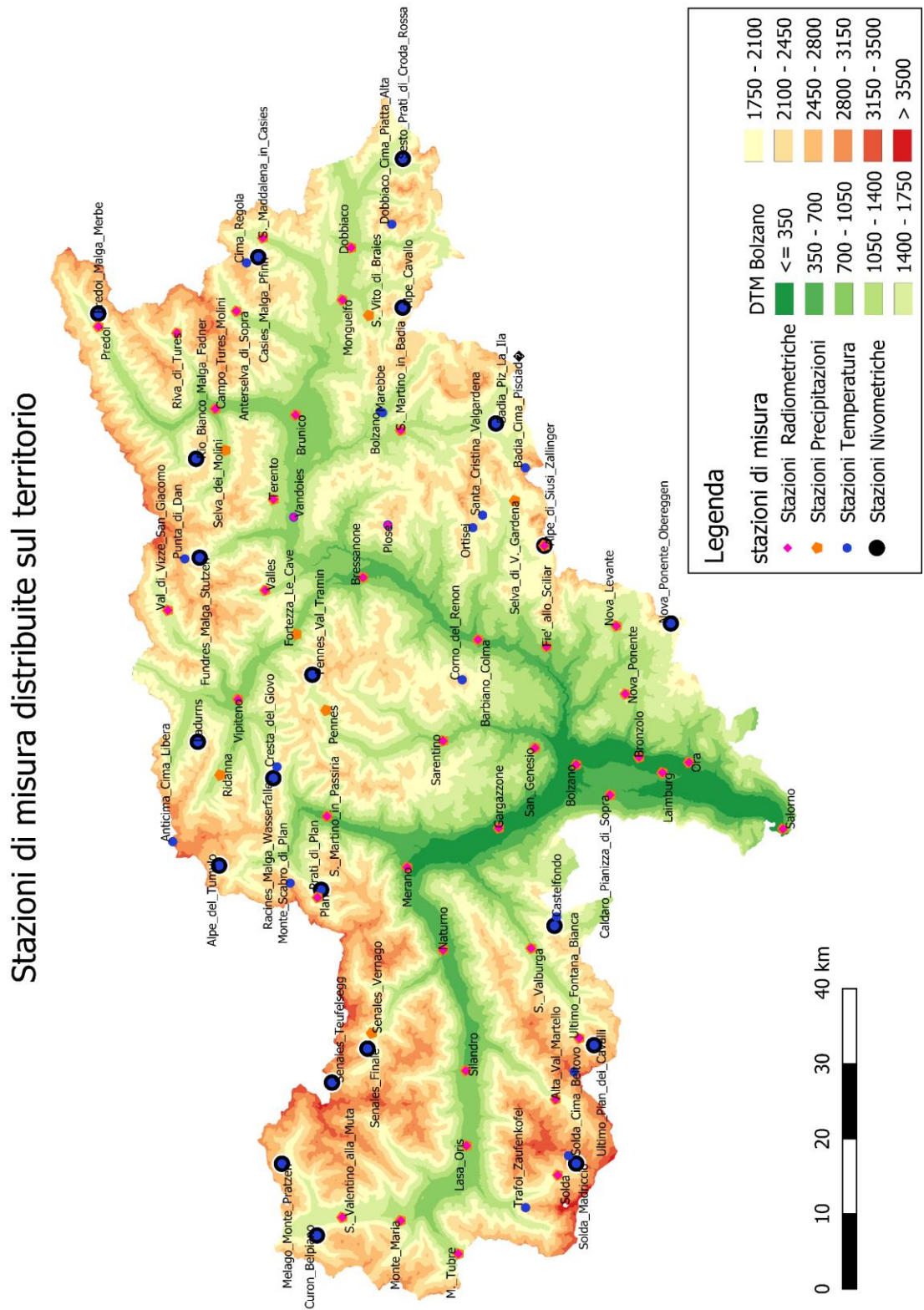


Figura 1.4 Rappresentazione distribuzione stazioni di misura

CAPITOLO 2

MODELLAZIONE DELLA FUSIONE NIVALE

Nel seguente capitolo si espongono le caratteristiche principali della fusione nivale e delle forze in gioco che ne determinano la formazione.

Viene esposta una panoramica dei modelli fisicamente basati ed empirici, per soffermarsi, infine, sulla descrizione del metodo ad indice di temperatura base e migliorato con il termine di radiazione.

2.1 Descrizione dello snowmelt, metodi empirici, concettuali e fisicamente basati

Lo snowmelt rappresenta il deflusso superficiale generato dalla fusione della neve. Come presentato nell'introduzione, esso assume un ruolo molto importante nel ciclo idrologico, per cui una corretta interpretazione della fusione nivale porta ad una corretta stima del ruscellamento, cosicché si possano evitare, di conseguenza,

situazioni estreme: dal rischio di situazioni pericolose quali alluvioni, al rischio di rimanere completamente a secco di acqua nei periodi siccitosi.

Per il calcolo di tale dato si hanno a disposizione diverse categorie di modelli, tra cui quelli empirici, concettuali e fisicamente basati.

A seconda dei dati considerati in input, il tipo di approccio utilizzato ed i processi considerati si possono distinguere tra:

- modelli fisicamente basati
- modelli concettuali
- modelli empirici.

2.1.1 Modelli fisicamente basati

I modelli fisicamente basati sono complessi per molteplici fattori: essi rappresentano e descrivono tutti i fenomeni fisici coinvolti ed esplicano le variabili mediante relazioni di input-output. In particolare, se considerassimo la fusione nivale dovrebbero essere considerate le seguenti variabili: precipitazioni, temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione, velocità del vento, topografia, altitudine, fenomeni di ricongelamento e numerosissime altre variabili e fenomeni, che sono legati alle proprietà geomorfologiche e meteorologiche del sito.

Il problema di questo procedimento è che, a fronte di un probabile buon modello che si potrebbe ottenere, vi è il dilemma di ottenere, per ogni singolo parametro inserito, valori validi, i quali sono spesso impossibili da ottenere in bacini montani.

2.1.2 Modelli empirici

I modelli empirici si fondano su relazioni matematiche che permettono di descrivere il fenomeno osservato, per un intervallo di tempo sufficiente a tarare il modello, tramite la raccolta e l'osservazione di dati misurati in ingresso e in uscita. Lo svantaggio è la limitata applicabilità, in quanto potrebbe non essere adattabile per altri casi di studio.

2.1.3 Modelli concettuali

I modelli concettuali sono una combinazione tra i modelli precedentemente definiti, ovvero: a partire da un input, si vuole riprodurre un output, attraverso l'introduzione di ipotesi sul funzionamento dei modelli.

2.2 Metodo day-degree e Metodo ad Indice di Temperatura migliorato

Nel seguente lavoro verranno considerati e confrontati due tipi di modelli concettuali basati su formulazioni empiriche della fusione nivale, ovvero:

- Approccio ad Indice di Temperatura (metodo Degree-day);
- Approccio basato sulla Temperatura con l'aggiunta del termine radiativo (metodo Degree-day Enhanced).

Nel primo caso il modello opera su un'unica variabile: la temperatura, mentre nel secondo si agisce su due variabili: temperatura e radiazione. In entrambi i modelli si lavora comunque su poche variabili per spiegare il fenomeno dello scioglimento.

Questo è anche il motivo per cui l'utilizzo di tale approccio determina il vantaggio di ridurre sia il problema della variabilità spaziale dei dati, sia quello della conoscenza delle caratteristiche della neve.

Nella Figura 2.1 vengono mostrati il tipo di variabili in ingresso e uscita impiegando due diversi approcci.

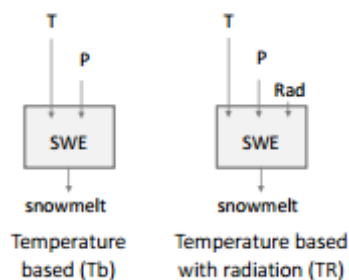


Figura 2.1 Rappresentazione sintetica degli approcci impiegati.

2.2.1 Approccio ad Indice di Temperatura

Questo approccio è il più conosciuto e il più utilizzato per il calcolo della fusione della neve e del ghiaccio; esso si basa su relazioni empiriche che legano la temperatura allo snowmelt (Lang and Braun, 1990) e fu introdotto nel 1960 da Martinec.

Questo metodo è di semplice formulazione e il suo vantaggio risiede non solo nella richiesta in ingresso dei dati di temperatura, ma anche nell'ampia disponibilità dei dati grazie alle numerose stazioni presenti e distribuite alle diverse quote del territorio. Una volta calibrati i parametri si ottengono risultati validi per l'area in esame, con un onere computazionale non gravoso vista la semplicità del modello. Aspetti che nell'insieme rendono questo modello potente, di facile utilizzo e con raggiungimento di risultati adeguati, nonostante la fisica del processo non venga descritta.

Il metodo del Degree-day calcola la quantità di acqua prodotta nell'unità di tempo, M [m/s], la quale è proporzionale alla differenza tra la temperatura dell'aria media, T_a [°C], e la temperatura di base, T_b [°C], moltiplicata per il fattore di fusione, m_f o fattore day-degree come riportato nell'eq.(2.1).

$$M = \begin{cases} m_f * (T_a - T_b) & T_a > T_b \\ 0 & T_a \leq T_b \end{cases} \quad (2.1)$$

Affinché avvenga il processo di fusione, la quantità di calore disponibile, misurata in unità chiamate gradi giorno, deve essere tale per cui in una giornata si ha una temperatura di 1°C superiore alla soglia di temperatura base, in caso contrario, il fenomeno di scioglimento non avviene, come rappresentato in Figura 2.2.

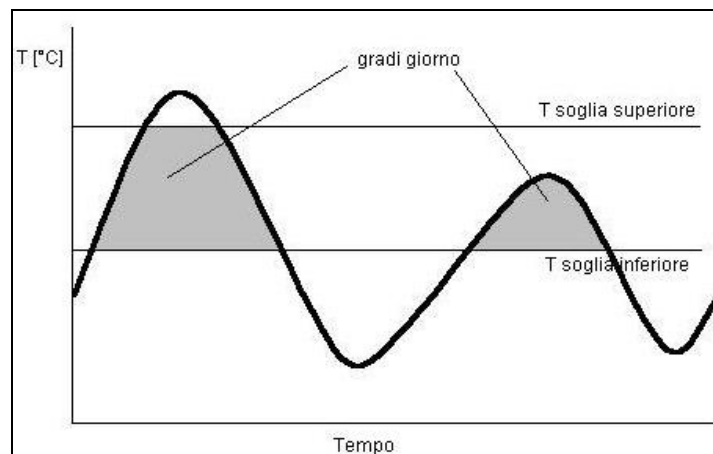


Figura 2.2 Schema del modello gradi giorno

Di seguito viene riportato lo script (Figura 2.3) di funzionamento inerente allo step di calcolo della fusione.

```
IF (temperatura <= t_soglia) THEN
    melt=0.
else
    IF(stato==0.) THEN
        melt=0.
    else
        melt=cm*(temperatura-t_soglia)           ![m/s]
    end if
END IF
return
end SUBROUTINE degree_day
```

Figura 2.3 Script del modello gradi giorno

Fattore di fusione

Diversi studi, riassunti da Hook (2003), hanno evidenziato una grande variabilità del valore m_f da sito a sito, poiché tiene conto di tutti i fattori fisici non inclusi nel modello. I valori derivano da diversi periodi e per intervalli di tempo differenti, da qualche giorno a qualche anno, determinando l'impossibilità di effettuare un confronto diretto; infatti, si è potuto stabilire un intervallo di possibili valori che fluttua tra $4.8 \cdot 10^{-8} \text{ m}/(^{\circ}\text{C s})$ e $6.9 \cdot 10^{-8} \text{ m}/(^{\circ}\text{C s})$.

A partire dagli anni '80 è stata proposta una equazione (2.2), affinché si potesse tener conto della topografia del luogo, come quella proposta da Male a Gray (1981)

$$C_m = C_m' R(1 - A) + 0.00126P \quad (2.2)$$

L'espressione introduce il valore di albedo A , una funzione che tiene conto dell'effetto della pioggia sul manto nevoso, e l'indice di Radiazione solare, R . Quest'ultimo è funzione di una determinata pendenza ed esposizione del versante a seconda del periodo considerato.

Nonostante l'aggiunta di caratteristiche spazio-temporali, il modello non considera ancora l'effetto delle montagne nella formazione di ombre, le quali andrebbero a modificare il valore di radiazione associato ad ogni cella.

La scelta del fattore di fusione può essere effettuata anche attraverso un processo di taratura del modello, basato sulle osservazioni misurate, infatti, nel seguente studio, si è percorso questo tipo di scelta ed il parametro melt factor è rimasto costante e pari a: $4 \cdot 10^{-8} \text{ [m/}^\circ\text{C} \cdot \text{s]}$.

Non è stata prevista una formulazione che tenga conto della variabilità spazio-temporale di C_m durante il periodo di accumulo, piuttosto che di quello di fusione, per non rinunciare alla semplicità dell'approccio.

Di seguito viene riportata la

Figura 2.4, che illustra le componenti in ingresso e uscita, oltre al modello impiegato.

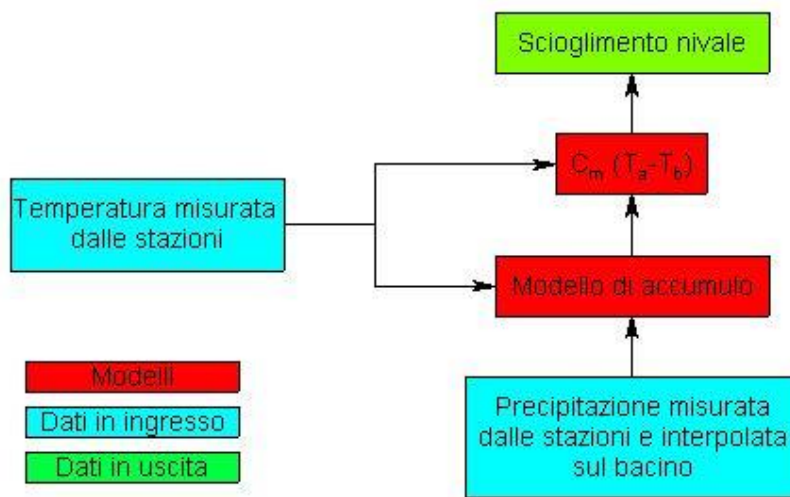


Figura 2.4 Relazione tra le grandezze coinvolte dell'approccio ad Indice di Temperatura

2.2.2 Approccio Indice di Temperatura con termine radiativo

Il metodo ad Indice di Temperatura migliorato calcola la quantità di acqua proveniente dalla fusione nivale introducendo, nel modello base, la radiazione solare incidente sulla superficie. Tale approccio risulta essere interessante per due aspetti:

- trae vantaggio dagli ottimi risultati ottenuti dal primo approccio;
- rende i risultati più fisicamente basati inserendo i dati di radiazione.

Swift (1976) fu uno dei primi studiosi a calcolare il totale della radiazione solare giornaliera rispetto a qualsiasi superficie inclinata ed a qualsiasi latitudine.

In seguito, sono stati condotti altri studi, tra cui quello di Casorzi e Dalla Fontana (2005), dove hanno proposto una formulazione che considerasse la fusione nivale funzione del giorno e della notte, ovvero secondo l'energia disponibile durante la giornata, oltre che della topografia.

L'approccio suddivide la fusione, e quindi il calcolo, a seconda dell'orario della giornata:

- dalle 6.00 del mattino fino alle 18.00 usando l'eq. (2.3)
- dalle 18.00 fino alle 6.00 usando l'eq. (2.4)

$$MELTd_{h,j} = CMF * EI_j * T_{h,j} \quad (2.3)$$

$$MELTn_{h,j} = CMF * \min EI_j * T_{h,j} \quad (2.4)$$

MELT, lo scioglimento [mm/h], calcolato per la j-esima cella è funzione del prodotto tra CMF, coefficiente di scioglimento [mm/(°C*EI*h)], EI_j, il quale identifica l'indice energetico dell'elemento dipendente dalla morfologia dell'elemento, moltiplicata per T_{h,j} che corrisponde alla temperatura dell'aria appartenente alla cella considerata.

In questo caso, il modello utilizzato fu introdotto da Kustas et al. nel 1994 con la seguente formulazione (2.5)

$$M = m_f * (T_a - T_b) + \alpha * R \quad (2.5)$$

Come verrà descritto nel capitolo 2.4.4, questo modello introduce R, la componente radiativa netta [W/m²], moltiplicata per alfa [(m/s) x (W/m²)⁻¹], la quale è un fattore per convertire la densità del flusso di energia per sciogliere la neve e oggetto di calibrazione.

La formula che determina la quantità equivalente di acqua sciolta non è altro che una media pesata, poiché si ha m_f moltiplicato per l'eccesso di T, rispetto alla temperatura base, sommato al prodotto tra il fattore empirico, alfa, della radiazione per il valore di radiazione netta. Quindi, ad ogni W/m² della radiazione, otteniamo quanti metri di neve al secondo vengono fusi, per ogni incremento di energia della radiazione.

Di seguito viene riportato lo script (Figura 2.5) inerente al calcolo della fusione con il metodo migliorato.

```
IF(temperatura <= t_soglia)THEN
    melt=0.
else
    IF(stato==0.)THEN
        melt=0.
    else
        melt=cm*(temperatura-t_soglia) + cm_rad * radiazione![m/s]
    end if
END IF
return
end SUBROUTINE degree_day_enhanced
```

Figura 2.5 Script del modello gradi giorno migliorato

Prima di procedere con l'analisi di calibrazione, è necessario soffermarsi sulla descrizione delle tecniche di interpolazione adottate per i dati in ingresso al modello. Ai fini dell'assegnazione dei dati meteorologici nello spazio, i dati raccolti -essendo a scala puntuale - hanno subito tecniche di interpolazione, pertanto: per ogni cella regolare della griglia, che ha suddiviso il territorio, è stato assegnato un valore di temperatura, precipitazione e radiazione.

L'intervallo dei dati considerato dal modello inizia a gennaio 2016 e finisce a dicembre 2019.

Di seguito una breve descrizione delle variabili in ingresso al modello e quella di confronto.

2.3 Interpolazione dei dati

2.3.1 Dati nivometrici

La presenza di nivometri distribuiti sul territorio, Figura 2.6, ha permesso di ottenere osservazioni orarie di altezza di neve, che sono state impiegate per il confronto con la simulazione dell'approccio ad Indice di Temperatura base e migliorato.

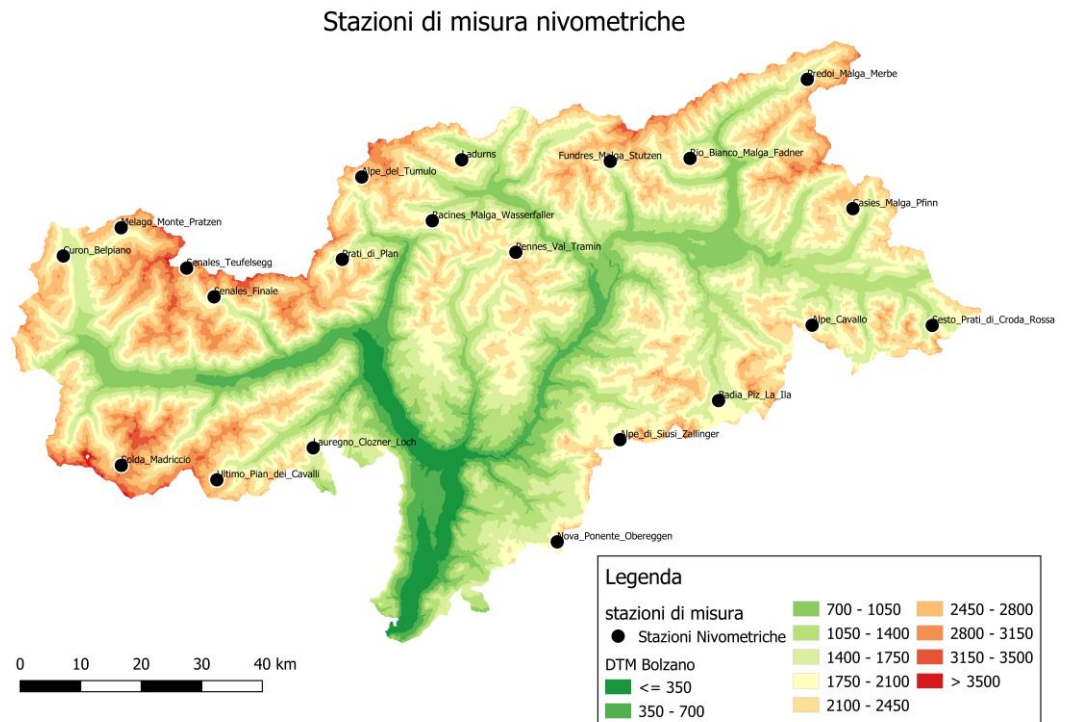


Figura 2.6 Rappresentazione distribuzioni di stazioni di misura nivometriche.

2.3.2 Dati Precipitazione

I dati raccolti dalle stazioni di misura rappresentati nella Figura 2.7 sono stati interpolati secondo il metodo della distanza inversa, considerando i 10 punti più vicini ad una risoluzione spaziale pari a 100m.

È stato implementato, inoltre, un gradiente di precipitazione in base alla quota considerata; poiché esso discende dal fatto che le misure di precipitazioni, alle quote elevate, sono incognite vista la mancanza di stazioni, si tiene in considerazione che alle elevate altitudini la precipitazione è maggiore rispetto alla pianura.

Per la Provincia Autonoma di Bolzano, il cui dislivello varia dai 207 m ai 3.905 m, questo gradiente equivale a 3.9×10^{-5} [mm/h/m].

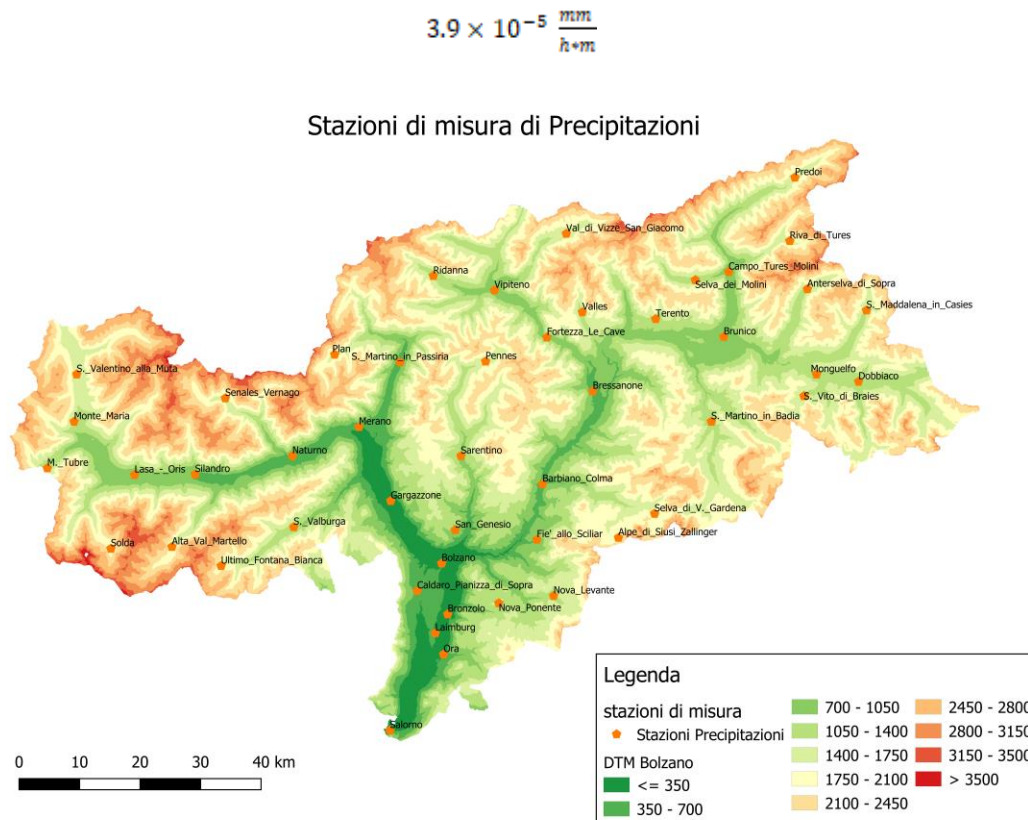


Figura 2.7 Rappresentazione distribuzione stazioni di misura delle precipitazioni.

2.3.3 Dati Temperatura

Affinché ogni cella avesse la propria informazione, i dati orari della temperatura media oraria, appartenenti alle stazioni presenti nella Figura 2.8, sono stati interpolati utilizzando il metodo della distanza inversa, considerando le 10 stazioni più vicine. Nell'algoritmo vengono presi in esame ulteriori due aspetti:

- 1- quota del punto interessato;
- 2- elaborazione, ad ogni ora, del gradiente di temperatura, a seconda dei dati in ingresso, ossia: il modello valuta i dati misurati in tutte le stazioni per ogni ora e calcola una regressione lineare di temperatura misurata rispetto alla quota della stazione. La pendenza di tale retta è il gradiente di temperatura.

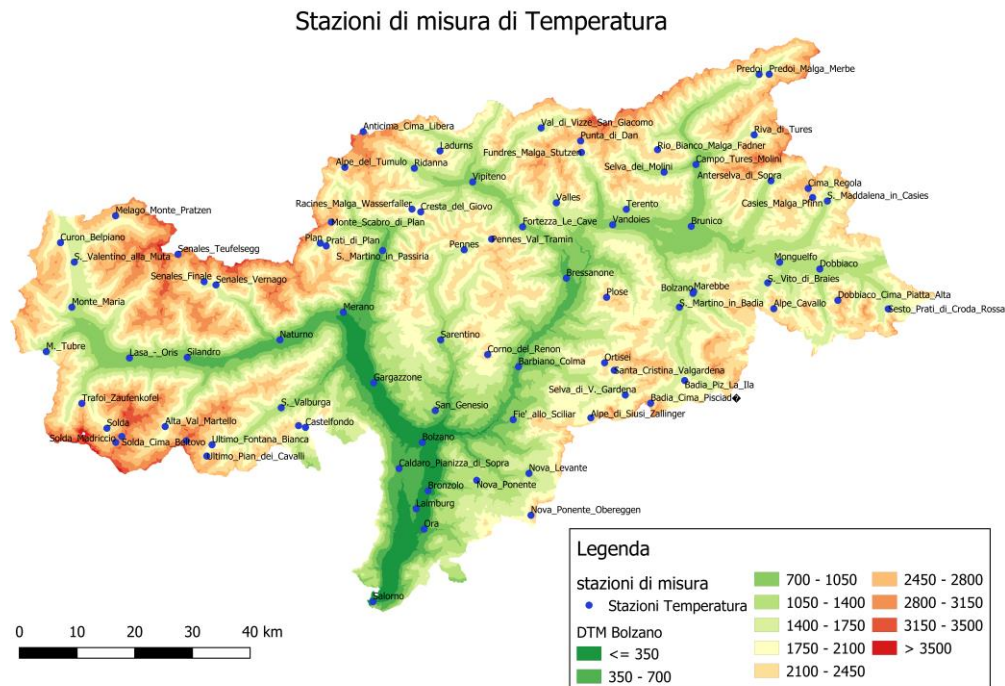


Figura 2.8 Rappresentazione distribuzione stazioni di misura di temperatura.

2.3.4 Dati Radiazione

Il dato di radiazione è una variabile meno comune rispetto a quelli precedentemente descritti. Fortunatamente, la Provincia Autonoma di Bolzano dispone di un numero significativo di stazioni rappresentate in Figura 2.9, le quali sono state impiegate per lo scopo.

Affinché l'intervallo utile alla calibrazione fosse esaustivo, è stato richiesto all'Ufficio Meteorologico della Provincia Autonoma di Bolzano l'integrazione della serie di dati per completare il periodo di riferimento 2016-2019.

I dati, come per la serie di precipitazione e temperatura, sono stati interpolati usando la medesima tecnica di interpolazione, alla medesima risoluzione spaziale.

In questo caso non è possibile identificare un gradiente per questa variabile, poiché essa è legata principalmente alla morfologia locale, che comprende esposizione dei versanti, inclinazione del suolo, pendenza.

Si potrebbe verificare, inoltre, la presenza di stretti e consistenti rilievi che, intercettando i raggi solari, potrebbero ombreggiare, per esempio, valli esposte anche a Sud, rendendo il suolo in ombra e diminuendo l'energia disponibile per la fusione della neve. L'altezza del sole varia a seconda del giorno e della stagione, tuttavia non è così importante quanto la prima osservazione.

Quindi si è proceduto all'utilizzo di un complesso algoritmo che considera questi fattori, per determinare la radiazione netta e utilizzarla nella simulazione.

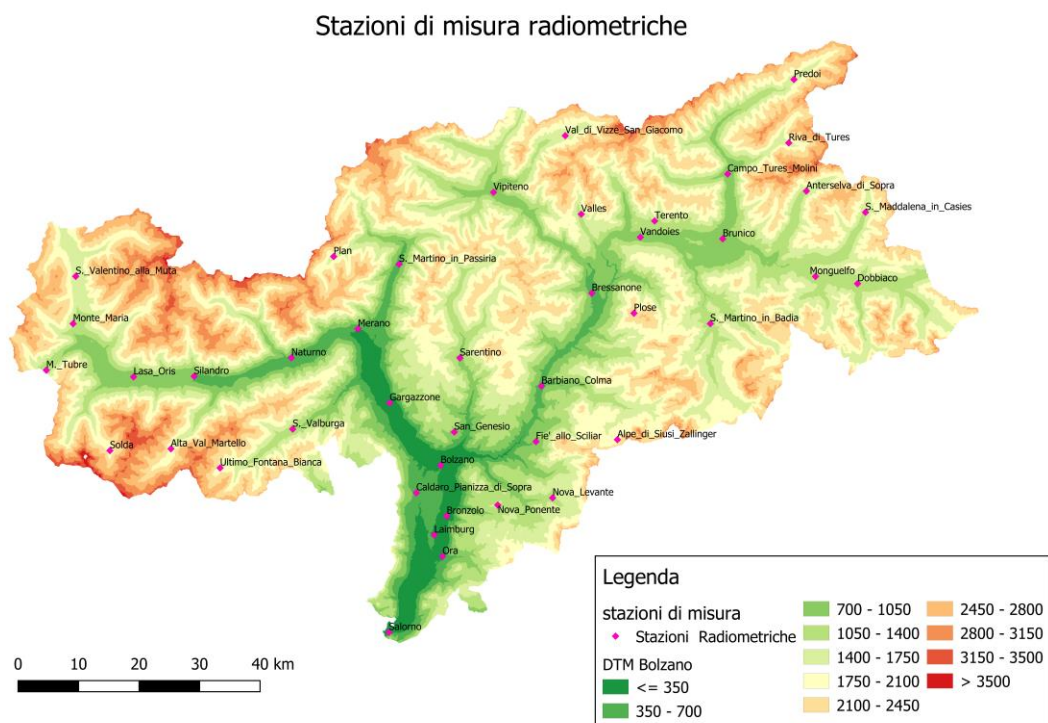


Figura 2.9 Rappresentazione distribuzione stazioni di misura radiometriche.

2.4 Modellazione della Radiazione

2.4.1 Radiazione solare

La radiazione solare non è altro che energia emessa dal Sole e trasmessa alle diverse onde elettromagnetiche. Il Sole viene considerato come un emettitore ideale e, secondo la legge di Wien (2.6), la massima emittanza corrisponde alla lunghezza d'onda di $\lambda = 500$ [nm]. Come viene rappresentato in Figura 2.10, si può notare che il 99% di lunghezze d'onde provenienti dal Sole viene emesso nel range 0.1 -5 μm , mentre la massima emissione della Terra avviene alla lunghezza d'onda lunga di $\lambda = 9.6$ [μm] (range 4-25 [μm]).

$$\lambda = \frac{2.90 \cdot 10^{-9}}{T} \quad \text{dove } T[K], \lambda[\mu\text{m}] \quad (2.6)$$

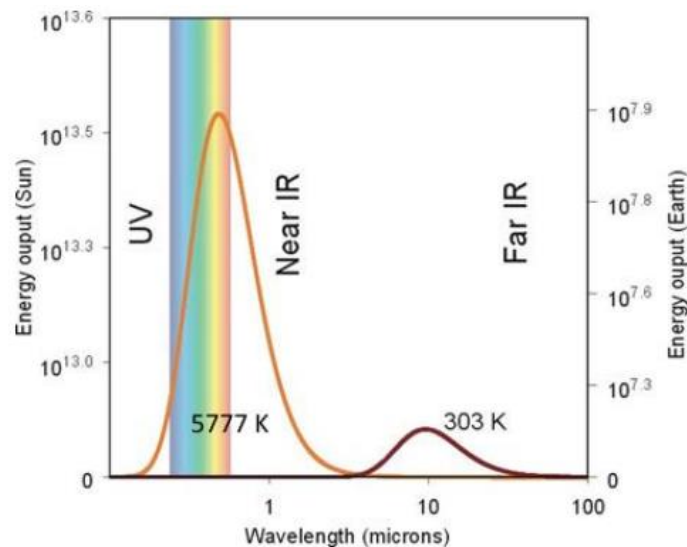


Figura 2.10 Intensità di emissione del corpo nero in funzione della lunghezza d'onda per varie temperature

Secondo la suddivisione della lunghezza d'onda, il sole emette alle onde corte ed è trascurabile la sua componente alle onde lunghe; mentre avviene il contrario per l'emissione della Terra: radiazioni elettromagnetiche importanti alle onde lunghe, ma trascurabili alle onde corte.

La radiazione proveniente dal Sole e misurata al limite esterno dell'atmosfera è pari a $1.370 \text{ [W/m}^2\text{]}$ e viene definita come Costante Solare I_0 .

Nell'attraversare l'atmosfera, le onde subiscono continue modifiche a causa della presenza di vari gas atmosferici, tra cui vapore acqueo, anidride carbonica, ozono, monossido di carbonio (Figura 2.11).

Il 70% delle radiazioni vengono assorbite, mentre il 30% vengono riflesse. In particolare, la quantità di radiazione assorbite dall'atmosfera e dalle nuvole è pari al 20%, mentre il 50% è assorbito dalla superficie terrestre. Il 40% di quest'ultima quantità viene riemessa in atmosfera mediante le onde lunghe della terra, il 60% viene trasferito all'atmosfera da processi turbolenti e convettivi, sotto forma di calore sensibile e calore latente.

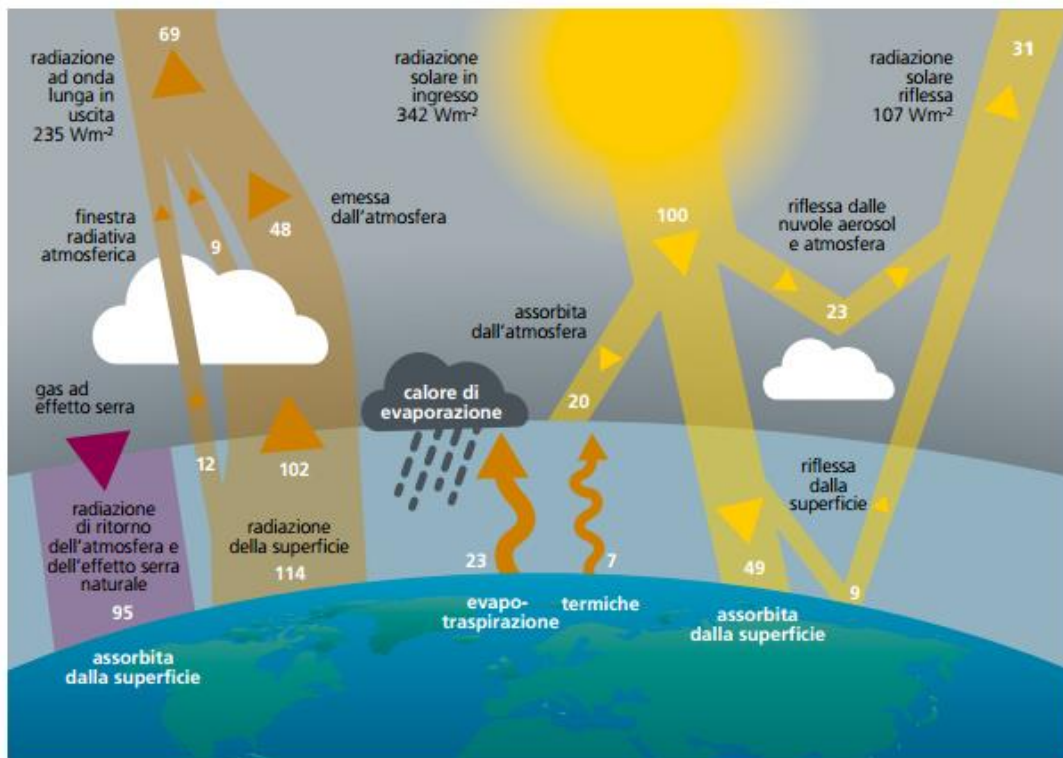


Figura 2.11 Schema flussi radiativi scambiati tra Sole, Terra e Atmosfera

La ragione per cui si vuole distinguere le componenti della radiazione tra onde lunghe ed onde corte è dovuta al fatto che in quest'ultima si riconosce la parte di quella che arriva direttamente al suolo e di quella dell'atmosfera.

2.4.2 La radiazione a onde corte

La quantità di radiazione solare che giunge al suolo in un certo momento dipende, oltre che dalle proprietà astronomiche caratterizzanti il moto del pianeta, dalla presenza o meno di nuvole oppure, per esempio, dalla trasparenza dell'atmosfera e dalla topografia dell'area, poiché alcuni pronunciati rilievi potrebbero produrre ombreggiamenti.

Per ottenere la quantità di radiazione solare è necessario determinare la posizione del Sole rispetto ad un punto sulla superficie terrestre tramite due angoli che definiscono rispettivamente altezza β , ovvero l'angolo formato tra la congiungente del punto al Sole e la proiezione sul piano dell'orizzonte, e azimuth ψ del Sole, ovvero l'angolo formato sulla proiezione orizzontale tra la direzione Nord-Sud (vedi Figura 2.12).

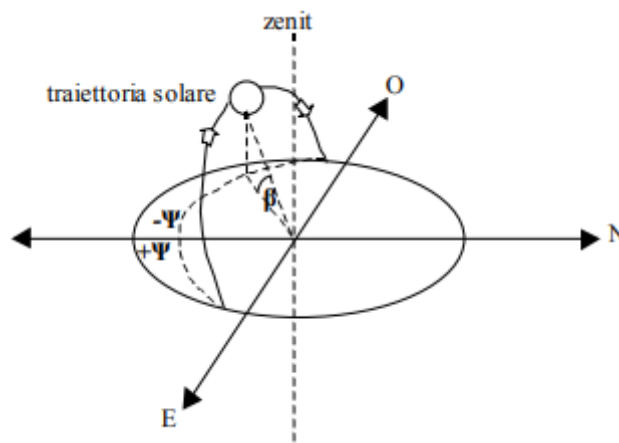


Figura 2.12 Identificazione della posizione del Sole lungo la traiettoria

Quindi, nell'emisfero Boreale, un rilievo esposto a Sud sarà investito da radiazioni dirette, mentre a Nord avverrà raramente; come anche un rilievo esposto a Est sarà irradiato prima di mezzogiorno e dopo le 12.00 sarà esposto il suo lato ovest.

Per ottenere ψ e β in qualunque ora e giorno nell'anno è necessario avere tre dati:

- Declinazione (δ)
- Angolo orario (ω)
- Latitudine (λ)

Viene riportata la formula di Gates (1980) per determinare l'altezza β (2.7)

$$\sin \beta = \sin \lambda * \sin \delta + \cos \lambda * \cos \delta * \cos \omega \quad (2.7)$$

Se $\beta > 0$ significa che il Sole è posizionato al di sopra del piano dell'orizzonte.

Si calcola l'angolo orario ω tramite (2.8)

$$\omega = 15(t - 12) \quad (2.8)$$

dove t corrisponde all'ora del giorno.

L'azimut, ψ , del Sole è dato dalla seguente relazione (2.9)

$$\cos \Psi = \frac{\sin \beta * \sin \lambda - \sin \delta}{\cos \beta * \cos \lambda} \quad (2.9)$$

Se ψ risulta maggiore di 0 significa sarà irradiato il lato Est; in caso contrario lo riceverà il lato Ovest.

Infine, viene riportata l'eq.(2.10) utilizzata per determinare la declinazione del Sole (δ)

Formula di Fourier:

$$\delta = \left(\begin{array}{l} 0.006918 - 0.399912 * \cos(\Gamma) + 0.070257 * \sin(\Gamma) - 0.006758 * \cos(2\Gamma) \\ + 0.000907 \sin(2\Gamma) - 0.002697 * \cos(3\Gamma) + 0.00148 * \sin(3\Gamma) \end{array} \right) \quad (2.10)$$

δ espresso in radianti [rad]

$$\Gamma = \frac{2\pi n_d}{365}$$

n_d corrisponde al numero del giorno dove 1 = 1° gennaio e 365 = 31 dicembre.

Come precedentemente citato, solo una frazione di I_0 giunge al suolo e sarà pari alla differenza tra il totale e la quantità assorbita e diffusa. Tuttavia, la presenza delle nuvole comporta un'ulteriore diminuzione della radiazione al suolo, come dimostra la Figura 2.13 .

Intensità approssimata della radiazione solare.









Radiazione solare	Condizioni atmosferiche							
	Cielo sereno	Nebbia	Nuvoloso	Disco solare giallo	Disco solare bianco	Sole appena percettibile	Nebbia fitta	Cielo coperto
								
globale	1000 W/m ²	600 W/m ²	500 W/m ²	400 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	100 W/m ²	50 W/m ²
diretta	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%
diffusa	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%

Figura 2.13 Ripartizione della radiazione solare globale

Pertanto, vengono considerati e descritti due casi:

- 1- Radiazione al suolo in condizioni di cielo sereno
- 2- Radiazione al suolo in condizioni di cielo coperto da nuvole.

Radiazione al suolo in condizioni di cielo sereno

In condizioni di cielo sereno, la radiazione diretta, calcolata mediante l'eq.(2.11) di Ranzi (1989), in direzione normale al suolo, risulta pari a:

$$I_c = I_o * e^{-\frac{s}{\sin(h)}} \sin(h) \quad (2.11)$$

Dove I_o è la costante solare, s è lo spessore ottico dell'atmosfera, ottenuto dalla formula (2.12) di Kreider & Kreith (1975).

$$s = s_o * \frac{P_h}{P_o} \quad (2.12)$$

Dove:

- s_o è lo spessore ottico al livello del mare;
- P_h/P_o è la correzione della pressione atmosferica;
- z è l'altitudine rispetto al livello del mare.

Per determinare le componenti ci si riferisce alle espressioni (2.13 e (2.14)

$$s_o = \sqrt{1229 + (614 * \sin(h))^2} - 614 * \sin(h) \quad (2.13)$$

$$\frac{P_h}{P_o} = \left(\frac{(288 - 0.0065 z)}{288} \right)^{5.256} \quad (2.14)$$

Segue l'espressione (2.15) per determinare la quantità di radiazione diffusa:

$$D = k * [I_o * \sin(h) - I_c] \quad (2.15)$$

dove k ha un valore compreso tra 0.2 e 0.6, a seguito della limpidezza dell'atmosfera. Dalla relazione (2.16) si determina il valore ottenuto dalla somma della quantità di radiazione diretta e della componente diffusa; il quale dovrebbe corrispondere a ciò che il sensore dovrebbe misurare in condizioni di cielo sereno.

$$R^* = I_c + D \quad (2.16)$$

Radiazione al suolo in condizioni di cielo coperto da nuvole.

In condizioni di cielo coperto, vi è una sensibile riduzione dell'energia che arriva al suolo, fino ad un valore minimo teorico di soglia pari a 0,22 di radiazione diffusa, espresso come quota p del valore teorico di radiazione, che arriva al suolo in condizioni di cielo sereno (R^*).

Da questo valore, si può desumere se la radiazione ha una componente maggiore di tipo diffuso o diretta.

Se la radiazione misurata al sensore, R_{mis} , è inferiore o uguale a $p * R^*$, allora viene assunta come diffusa secondo l'eq.(2.17)

$$R_{mis} \leq p * R^* \rightarrow K_t = 1 \quad (2.17)$$

In caso contrario, K_t , varia con una relazione lineare tra 0 (cielo sereno) e 1 (cielo coperto) secondo la formulazione n. (2.18) di Ranzi:

$$K_t = \frac{R^* - R_{mis}}{(1 - p) * R^*} \quad (2.18)$$

Noto K_t , R_{mis} , D è possibile calcolare Q e DF , rispettivamente componente diretta (2.19) e diffusa (2.20) della radiazione misurata al sensore.

$$DF = \min[R_{mis} * D * (1 - K_t) + R_{mis} * K_t] \quad (2.19)$$

$$Q = R_{mis} - DF \quad (2.20)$$

Le caratteristiche topografiche, oltre ad esposizione e pendio, influenzano anche la radiazione diretta che arriva al suolo, poiché il raggio potrebbe incontrare ostacoli morfologici (vedi Figura 2.14).

Tale algoritmo è stato implementato dall' Ing. Martinelli nel modello e permette di determinare, per ogni ora, quali zone sono esposte direttamente ai raggi e quali di esse rimangono in ombra.

Vengono prese in considerazione le coordinate della cella di interesse (X_o, Y_o, Z_o) e quelle della cella di massima elevazione (X,Y,Z) nella direzione dei raggi.

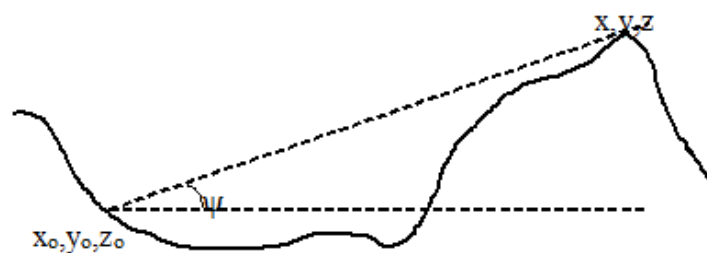


Figura 2.14 Determinazione delle zone in ombra dovute all'intercettazione dei raggi solari data la presenza di rilievi

L'algoritmo calcola ψ tramite la formulazione (2.21)

$$\psi = \arctg \left(\frac{Z - Z_0}{\sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2}} \right) \quad (2.21)$$

Se ψ sarà maggiore dell'angolo di elevazione della cella allora di interesse, essa sarà in ombra, quindi, riceverà solo radiazione diffusa e non diretta.

$$R_{xy} = DF \quad (2.22)$$

In caso contrario riceverà radiazione diretta e una quota parte di radiazione diffusa.

Per determinare la prima parte (2.23), (Ranzi 1989), sarà uguale a:

$$Q_{xy} = \frac{Q \cos(T)}{\sin(h)} \quad (2.23)$$

Nella condizione in cui l'angolo T, formato dai raggi solari e la perpendicolare alla superficie, risulti maggiore o minore di 90° , come rappresentato nella Figura 2.15, l'area sarà sottoposta a radiazione diffusa o diretta.

Nella fattispecie sono da considerare due casi:

- se $\cos(T) > 90^\circ$, valore negativo, quindi, vi sarà solo Radiazione Diffusa, poiché il versante non è direttamente irradiato;
- se $\cos(T) < 90^\circ$, valore positivo, vi sarà Radiazione incidente, diretta, nella cella interessata.

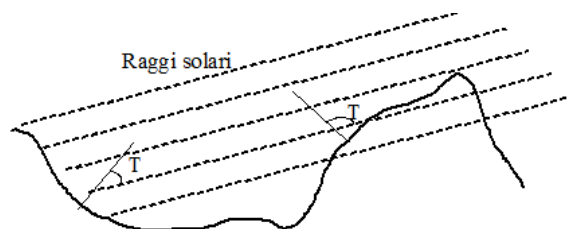


Figura 2.15 Angolo T formato dall'intersezione dalla direzione dei raggi solari con la perpendicolare alla superficie

In particolare, $\cos(T)$ viene determinato attraverso la formula di Campbell (1981):

$$\cos(T) = \cos(h) * \sin(\alpha) * \cos(B - E) + \sin(h) * \cos(\alpha) \quad (2.24)$$

L'equazione sarà determinata dalle seguenti grandezze: altezza solare (h), Azimut (B) e da α ed E , le quali sono angoli, ma rispettivamente indicano l'inclinazione del versante rispetto all'orizzontale e l'angolo di esposizione del versante.

Infine, la formula (2.25) risulta semplificata nel caso in cui $\cos(T=0^\circ)=1$, divenendo:

$$Q_{xy} = \frac{Q}{\sin(h)} \quad (2.25)$$

Una volta che l'algoritmo identifica la zona irradiata direttamente sui versanti, è possibile determinare la quota parte di Radiazione Riflessa delle zone circostanti tramite l'equazione (2.26):

$$A = Q_{xy} * R * (1 - f_\alpha) \quad (2.26)$$

$$f_\alpha = 1 - \frac{\alpha}{180}$$

Dove R è l'albedo del suolo, f_α è un coefficiente legato al pendio, α (deg) è la pendenza del versante.

La radiazione ad onde corte, che arriva al suolo, sarà data dalla somma di tutte le tre componenti come presentato dalla formulazione (2.27)

$$R_{xy} = Q_{xy} + DF + A \quad (2.27)$$

2.4.3 La radiazione ad onde lunghe

A partire dallo schema del bilancio radiativo terrestre (Figura 2.11), si è parlato di radiazioni ad onde corte e radiazioni ad onde lunghe. In particolare, queste ultime appartengono alle onde emesse dalla Terra, ma anche dall'atmosfera.

Nel caso di assenza di misure, il modello procederebbe nel seguente modo:

- calcolo della radiazione ad onde lunghe, emessa dall'atmosfera R_{ld} , in condizioni di cielo sereno e copertura nuvolosa;
- calcolo della radiazione ad onde lunghe emessa dalla superficie terrestre, R_{lu}

Calcolo della radiazione emessa dall'atmosfera in condizioni di cielo sereno secondo le formule (2.28) e (2.29)

$$R_{ldc} = \xi_{ac} * \sigma * T_a^4 \quad (2.28)$$

$$\xi_{ac} = 0,92 * 10^{-5} * T_a^2 \quad (2.29)$$

Dove:

ξ_{ac} è l'emissività atmosferica con cielo sereno Swinbank (1963);

σ è la costante di Boltzmann: 5.67×10^{-8} [W/m²*K⁴];

T_a è la temperatura dell'aria (K).

Calcolo della radiazione emessa dall'atmosfera in condizioni di cielo coperto (2.30)

$$R_{ld} = R_{ldc} * (1 + a * K_t^b) \quad (2.30)$$

Dove:

- K_t è l'indice di copertura nuvolosa data dalla differenza tra 1 e il rapporto di radiazione effettiva/radiazione a cielo sereno;

- a, b valori costanti proposti da Bolz (1949), b=2 ed a dipende dal tipo di nuvole presenti.

Nel seguente studio verrà utilizzato un valore costante pari al valore medio (a=0,20).

Calcolo della radiazione emessa dalla superficie terrestre (2.31)

$$R_{lu} = \xi_s * \sigma * T_s^4 \quad (2.31)$$

Dove:

ξ_s è l'emissività della superficie assunta pari a 0,97 (Anderson, 1954);

σ è la costante di Boltzmann 5.67×10^{-8} [W/m²*K⁴];

T_s è la temperatura del suolo (K).

Essendo T_s un dato difficilmente reperibile, può essere sostituito con T_a .

2.4.4 Radiazione netta

La radiazione netta non è altro che la differenza tra la radiazione entrante e quella uscente delle onde lunghe e di quelle corte espressa dalla (2.32)

$$R_n = S_{in} - S_{out} + L_{in} - L_{out} \quad (2.32)$$

In particolare, abbiamo:

$$S_{in} - S_{out} = (1 - r) * S_{in}$$

$$L_{in} - L_{out} = (1 - r) * R_{ld} - R_{lu}$$

Dove:

S_{in} è la radiazione ad onde corte, che arriva al suolo;

S_{out} è la radiazione ad onde corte, emessa dal suolo;

r è l'albedo;

R_{ld} è la radiazione ad onde lunghe, emessa dall'atmosfera in condizioni di cielo coperto;

R_{lu} è la radiazione ad onde lunghe, emessa dalla superficie terrestre.

CAPITOLO 3

CALIBRAZIONE

L'obiettivo della tesi è calibrare il modello ad Indice di Temperatura migliorato grazie alla disponibilità delle osservazioni dell'altezza di neve, raccolte nelle stazioni presenti sul territorio, per il periodo di riferimento 2016-2019, ed utilizzate per il confronto dello Snow Water Equivalent (SWE).

In questo capitolo, verranno coinvolti i risultati, ottenuti con il modello Degree-day precedentemente tarato e calibrato, utili per il raffronto con gli andamenti del nuovo modello e con i dati reali. Infine, sarà determinato se l'utilizzo del nuovo approccio darà un miglioramento fattivo alla stima della fusione nivale, al fine di valutare e discutere gli eventuali vantaggi e svantaggi.

3.1 Metodo ad Indice di Temperatura base

Il metodo base richiede in ingresso i dati di precipitazione forniti dal pluviometro ed i dati di temperatura. Affinché il modello fosse usufruibile per i diversi scopi, come è anche avvenuto per l'oggetto in esame, è stato calibrato e

convalidato. L'oggetto di calibrazione del metodo Degree-day era il parametro melt factor (mf), che è stato fissato pari a $4 \cdot 10^{-8}$ per la Provincia Autonoma di Bolzano.

3.2 Metodo ad Indice di Temperatura con termine radiativo

I dati meteorologici di temperatura dell'aria, radiazione solare, precipitazioni, insieme alla complessa topografia dell'area di interesse, ricoprono un ruolo fondamentale all'interno del nostro modello. Come supporto, abbiamo il DTM (Digital Terrain Model): una rappresentazione grafica discretizzata del terreno da celle regolari, dove, per ognuna di esse viene contenuta l'informazione dei dati di elevazione per rappresentare il terreno.

Il DTM viene definito come dato sorgente, poiché utile nell'eseguire analisi spaziali e ottenere le carte di pendenza, curvatura ed esposizione dei versanti, generazione di profili topografici e curve di livello utili per caratterizzare l'area.

Essendo uno studio condotto in un territorio prettamente montuoso, è necessario considerare la radiazione come indice distribuito e non come valore puntuale in maniera tale che, all'interno dello studio, vengano incluse anche le zone d'ombra, causate dalla presenza del rilievo.

L'approccio richiede in ingresso i dati di precipitazione, forniti dal pluviometro, i dati di temperatura e le osservazioni radiometriche. Il periodo di riferimento considerato copre il periodo 2016-2019, sufficiente a calibrare e tarare il modello; tuttavia, essendo i dati nivometrici disponibili fino a novembre 2019, la simulazione è stata interrotta nello stesso periodo.

3.2.1 Configurazione del modello

La configurazione degli indici e dei parametri del modello comprende sia valori di default, definiti per tutte le simulazioni, sia l'oggetto di calibrazione alfa. Di seguito viene riportata la descrizione:

- 1- il valore iniziale dell'altezza di neve è pari a 0, ovvero: dal momento in cui inizia la simulazione vengono determinate le quantità di neve cumulata e sciolta, a prescindere dalla presenza di neve o meno sul terreno antecedente al periodo preso in considerazione;
- 2- intervallo di accumulo minimo e massimo pari a 0 e 1 rispettivamente;
- 3- melt factor (mf) pari a $4 \cdot 10^{-8}$ [m/s/°C], uguale a quello utilizzato nel metodo base;
- 4- temperatura di soglia in cui inizia ad avvenire la fusione pari a 1°C;
- 5- alfa pari a $3 \cdot 10^{-9}$ [(m/s)/(W/m²)], fattore legato alla radiazione;
- 6- soglia nuova neve pari a 0.01, ovvero è la soglia oltre la quale viene identificata la presenza di nuova neve; altrimenti viene considerata come precipitazione liquida;
- 7- albedo massimo e minimo pari a 0.839 e 0.39 rispettivamente;

Questi indici non compaiono direttamente nella formulazione (2.5), ma fanno parte dell'algoritmo che calcola, ora per ora, temperatura, radiazione netta e precipitazione per ogni cella regolare della griglia che suddivide il territorio.

Essendo il problema volto alla calibrazione del fattore alfa legato al termine radiativo, si ha la necessità di ottenere i risultati nei punti in cui sono presenti le stazioni che hanno raccolto e misurato le osservazioni relative all'altezza di neve per il confronto.

Per ogni simulazione eseguita vi sono diversi file output, che contengono le seguenti informazioni:

- per le 21 stazioni in cui possediamo i dati nivometrici, vi sono informazioni orarie della stima della copertura nevosa SWE (m);
- per le aree di Bolzano, Giovaretto, Lagopesce, Lagoverde, Monguelfo, Neves, San Valentino, Vernago, Zoccolo sono stati ottenuti valori areali medi delle variabili meteorologiche meteo (precipitazioni [mm], temperatura [°C] e radiazione solare [W/m²]) e della neve (liquid-precipitation [mm], snow-water-equivalent [mm], free-water [mm] e snow-covered-area della regione considerata).

Lo SWE (snow water equivalent) è un dato orario, che fornisce i mm medi di precipitazione, per ogni cella, che si sono accumulati e/o fusi nell'intervallo di tempo considerato.

Si parte da una condizione che verifica se, all'interno della cella, vi è presenza di neve e se la temperatura è maggiore della T di soglia, allora nel seguente caso, avviene il fenomeno della fusione. In circostanze contrarie, avviene solo l'accumulo di neve. Ovviamente potrebbe accadere una situazione di mezzo: una certa quantità di neve si accumula ed un'altra quantità si scioglie data una temperatura compresa tra 0°C e 1°C.

Quello che è certo è che tale bilancio, che ha luogo ora per ora, dipende dallo stato precedente.

Nota la formulazione, ci si aspetta che lo SWE aumenti durante l'inverno fino ad arrivare ad una situazione stazionaria, dopodiché tenda a diminuire con l'arrivo del periodo primaverile ed estivo; quello che può variare è l'inizio dell'accumulo della neve e la fine della fusione a seconda della stazione considerata.

3.2.2 Risultati prima calibrazione

Un primo controllo qualitativo della simulazione viene effettuato confrontando i dati SWE (m) con l'altezza di neve (cm) osservata in un unico grafico temporale, insieme alla simulazione calibrata e convalidata dell'approccio ad Indice di Temperatura.

I primi mesi, poiché risultano essere dipendenti dalla condizione iniziale, vengono scartati; per cui l'analisi inizierà a partire da novembre 2016. Questa scelta non è casuale, poiché corrisponde anche alla fine del periodo di fusione e l'inizio della fase di immagazzinamento di neve.

Come citato precedentemente si vuole confrontare SWE (m) con i valori osservati (cm); tuttavia, siccome non si può ricostruire l'andamento della neve in maniera precisa, nota la mancanza dei dati relativi alla densità del manto nevoso, le grandezze non sono, dunque, direttamente confrontabili.

Quello che è possibile paragonare è l'andamento dei valori osservati nel tempo con l'andamento di SWE simulato e controllare che non ci sia uno sfasamento temporale del fenomeno di cumulo e fusione.

I quattro grafici di seguito riportati mostrano gli andamenti dello SWE orario per ogni approccio impiegato (vedi Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3 e Figura 3.4), confrontato con i dati misurati raccolti dalle stazioni ubicate a quote diverse.

Le rappresentazioni sono così strutturate:

- lungo l'asse delle ascisse, l'intervallo di tempo considerato;
- lungo l'asse delle ordinate primario (sinistra), i valori osservati;
- lungo l'asse secondario (destra), lo SWE prodotto dalla simulazione;
- linea blu indica l'andamento dei valori osservati,

- linea gialla riproduce l'andamento dei valori simulati con l'approccio Degree-day
- linea grigia raffigura l'andamento dei valori simulati con l'approccio ad Indice di Temperatura migliorato.

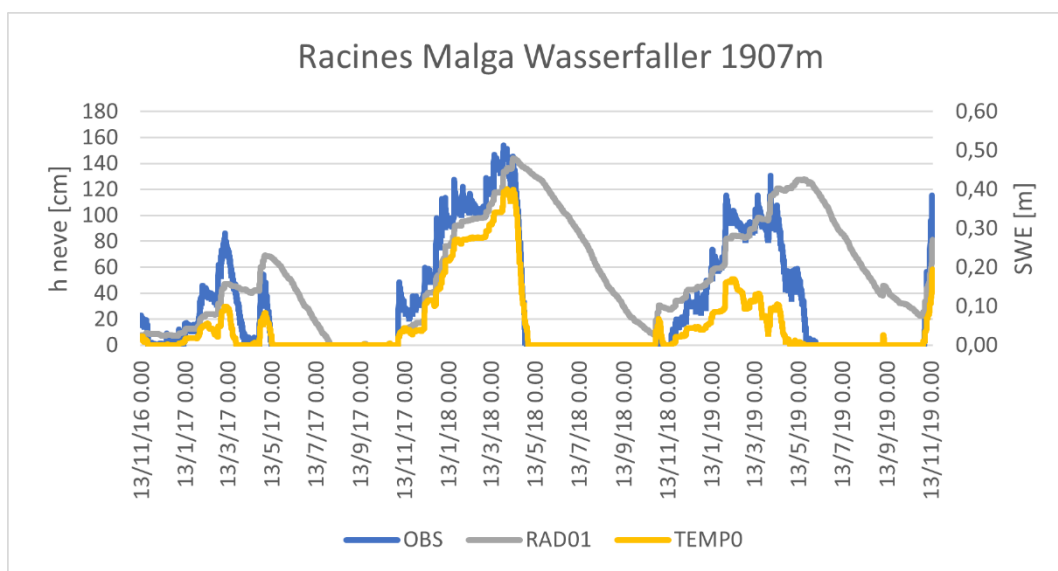


Figura 3.1 Racines Malga Wasserfaller

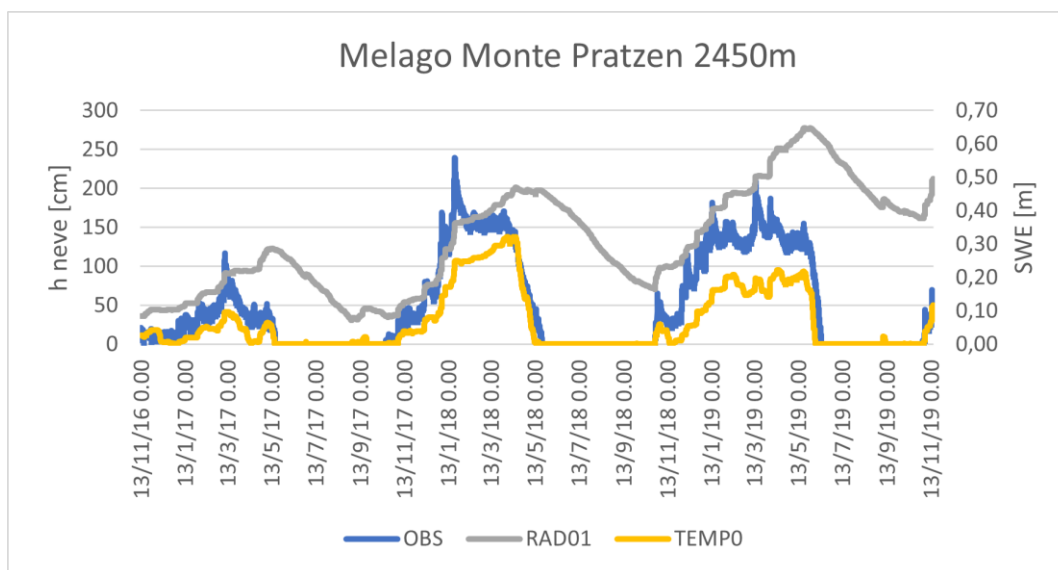


Figura 3.2 Melago Monte Pratzen

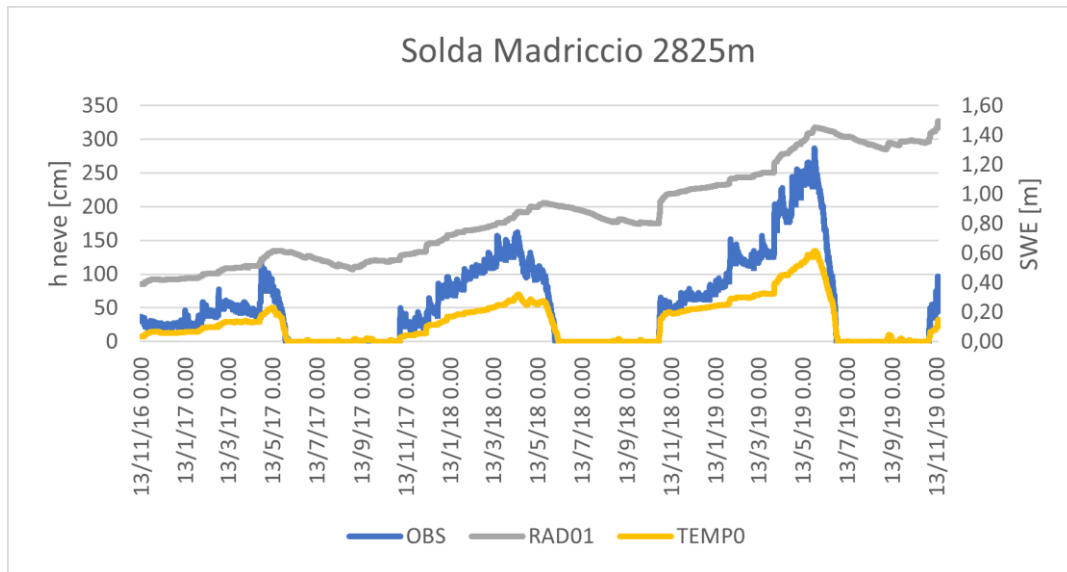


Figura 3.3 Solda Maldriccio

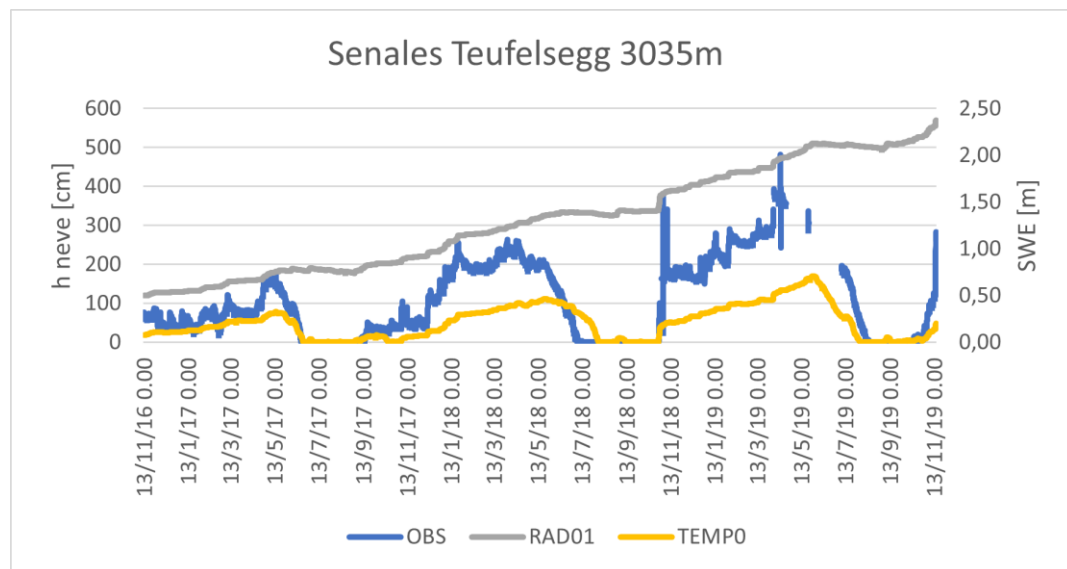


Figura 3.4 Senales Teufelsegg

Osservando i grafici, alle diverse quote, è indiscutibile il fatto che il parametro utilizzato per la prima simulazione, Rado1, è errato. Ciò è evidente soprattutto se cambia l'altitudine passando dalle quote più basse a quelle più elevate.

Se guardiamo la Figura 3.1 è possibile notare uno sfasamento nella fusione di 6 mesi; ciò indica che il parametro utilizzato non fonde abbastanza velocemente rispetto all'andamento dei valori osservati.

I grafici Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4, evidenziano l'assenza di una condizione ciclica che avviene da novembre a metà maggio, con la conseguenza di un continuo accumulo e fusione, anche nel periodo in cui non dovrebbe avvenire alcun processo.

La rappresentazione grafica ci fornisce un anticipo qualitativo dei risultati del modello; tuttavia, viene effettuata un'analisi numerica per comprendere quali siano i risultati del simulatore, rispetto a quelli reali.

Per concretizzare questa analisi si è previsto l'utilizzo di un algoritmo che ha permesso di filtrare i risultati e raggrupparli in una tabella di contingenza.

Affinché la comprensione fosse più rapida, viene proposto il seguente diagramma di flusso (Figura 3.5), in cui ogni risultato orario della simulazione di ogni stazione è stato soggetto al medesimo processamento di confronto con il dato orario reale.

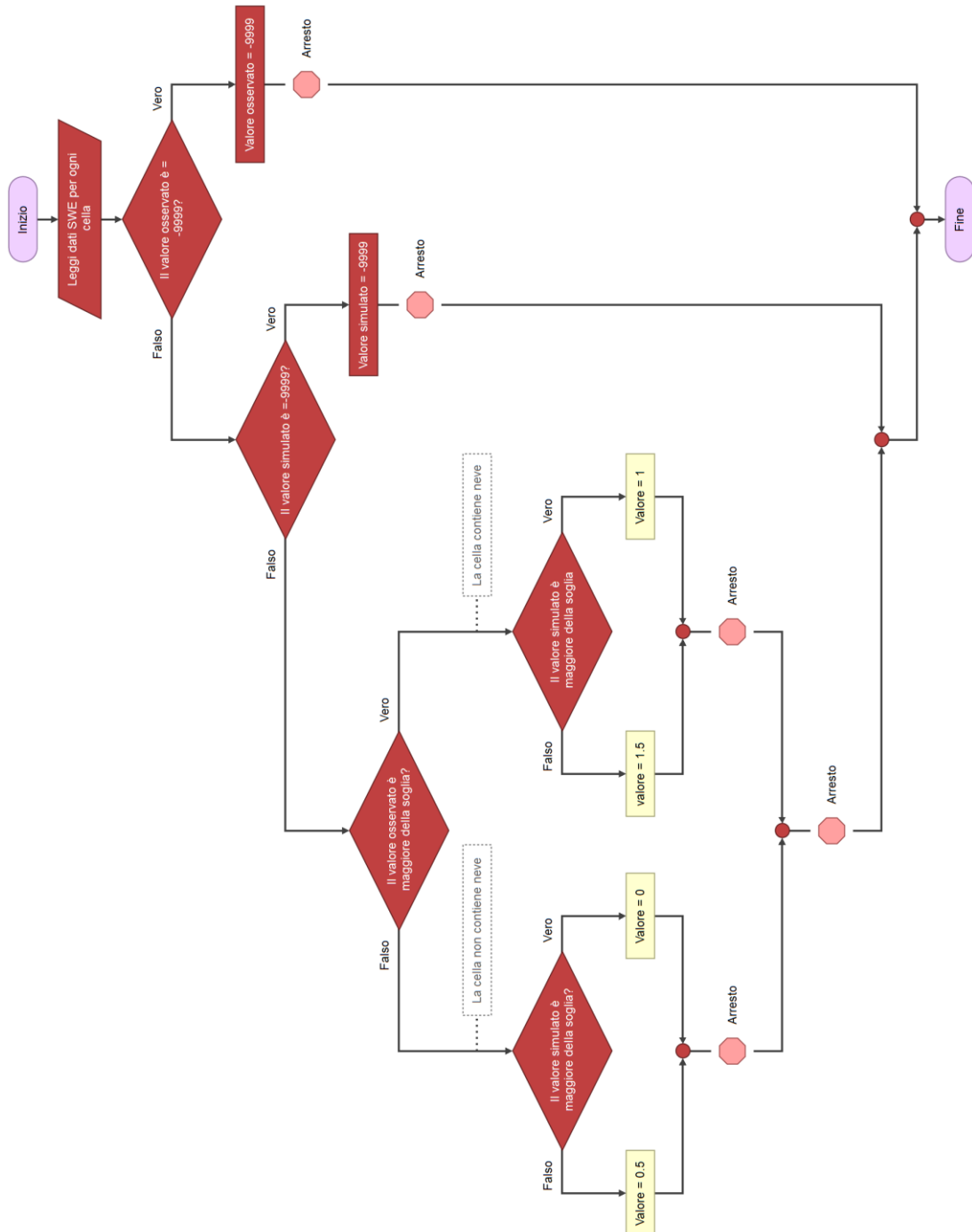


Figura 3.5 Rappresentazione dell’algoritmo che confronta i dati osservati con quelli simulati

La parte iniziale è attinente alla presenza di valori nulli, i quali sono stati esclusi dal raggruppamento. Il valore di soglia presente nell'algoritmo non è altro che il valore che determina la discriminante di valori di precipitazione solida e liquida.

In passato questo valore è stato calibrato, poiché il valore 0, come valore di soglia, avrebbe significato che anche la più piccola quantità rilevabile avrebbe assegnato la presenza di neve all'interno del simulatore, producendo risultati sovrastimati. Quindi in questo caso il valore di soglia è stato assegnato pari a 0.01. L'assegnazione dei valori 0, 0.5, 1, 1.5 dipende dalla coerenza dei dati risultanti dal simulatore rispetto a quelli osservati.

Di seguito viene data la definizione dei quattro indici utilizzati all'interno dell'algoritmo:

- 0 è il valore che indica l'assenza di precipitazione solida nella realtà, ma non nei risultati del simulatore (sovrastima dei risultati);
- 0.5 è il numero che esprime l'assenza di precipitazione solida sia nella realtà, sia nei risultati del simulatore (coerenza dei risultati);
- 1 è la cifra che denota la presenza di precipitazione solida nell'area in esame e altresì nei risultati del simulatore (coerenza dei risultati);
- 1.5 individua la presenza di precipitazione solida nella realtà, ma non nei risultati del simulatore (sottostima dei risultati).

La tabella di contingenza ha permesso di raggruppare i risultati, filtrati dagli indici, per quantificare il numero di ore identificate correttamente dal simulatore, quelle sovrastimate e quelle sottostimate.

A livello generale, si possono osservare i risultati ottenuti della prima simulazione, Rado1, ordinati nella tabella a doppia entrata generale ed in quella normalizzata

Tabella 3.1 e si può concludere che:

- al 62% il modello è concorde con i dati osservati;
- al 1% vi è stata una sottostima della simulazione, mentre
- al 38% vi è stata una sovrastima.

		STAZIONI				STAZIONI	
		No neve	Neve			No neve	Neve
Rado1	No neve	67609	2766	Rado1	No neve	0,15	0,01
	Neve	168635	208942		Neve	0,38	0,47

Tabella 3.1 Tabella di contingenza risultati simulazione Rado1

I risultati di tutte le stazioni presenti sul territorio, di cui era possibile avere uno riscontro con i dati osservati, sono stati riportati nella sottostante

Tabella 3.2, alla dicitura good index Rado1.

Oltre a tale valore, dato dalla somma dei valori presenti sulla diagonale principale della tabella a doppia entrata, sono stati riportati altri indicatori, caratterizzanti l'ubicazione della stazione, tra cui esposizione, quota, coordinate della stazione nel sistema di riferimento WGS84 UTM 32N, ed infine l'indicatore ottenuto con l'approccio ad Indice di Temperatura base.

Nome della stazione	Esposizione	Quota	latitudine	longitudine	Indice Rad01	Indice temp0
Alpe di Siusi	227	2055	706267	5154436	0,79	0,85
Nova Ponente	271	1470	686486	5143630	0,79	0,83
Curon Belpiano	40	2040	614326	5184760	0,47	0,93
Monte Pratzen	194	2450	623874	5189422	0,51	0,94
Madriccio	279	2825	623901	5150187	0,53	0,95
Teufelsegg – Giovo del Diavolo	183	3035	634696	5182751	0,69	0,87
Senales Finale	157	1950	639220	5178015	0,87	0,84
Alpe del Tumulo	239	2230	663615	5197801	0,49	0,99
Prati di Plan	312	2015	660393	5184194	0,59	0,93
Piani dei Cavalli	353	2255	639686	5147806	0,48	0,97
Ladurns	84	1960	680117	5200634	0,56	0,93
Malga Wasserfaller	15	1907	675262	5190572	0,54	0,95
Alpe Cavallo	199	2340	737994	5173329	0,47	0,96
Malga Pfinn	75	2152	744722	5192575	0,65	0,95
Malga Merbe	270	2006	737193	5213916	0,56	0,87
Malga Fadner	331	2155	717838	5200867	0,62	0,96
Badia Piz La Ila	294	2050	722543	5160892	0,75	0,84
Malga Stutzen	189	2050	704653	5200382	0,65	0,91
Val Tramin	185	2100	689061	5185368	0,54	0,96
Clozner Loch	182	2165	655593	5153087	0,67	0,87
Prati di Croda Rossa	356	1910	757830	5173296	0,74	0,88

Tabella 3.2 Good index della simulazione con e senza termine radiativo

Come si può osservare dai risultati nella

Tabella 3.2, l'indice di buon funzionamento presenta un minimo a 0.47 ed un massimo a 0.87; tuttavia, questi valori confrontati con il modello ad Indice di Temperatura sono inferiori, oltre che essere inesatti per i motivi citati precedentemente, quindi la conclusione numerica conferma ciò che si era presunto inizialmente dagli andamenti dei grafici; di conseguenza è stata proposta una nuova calibrazione, al quale viene assegnato un valore alfa pari a $3 \cdot 10^{-8}$ [(m/s)/(W/m²)], avente un ordine di grandezza inferiore rispetto al caso precedente.

3.2.3 Risultati seconda Calibrazione Rado2

Con l'assegnazione del nuovo valore alfa pari a $3 \cdot 10^{-8}$ [(m/s)/(W/m²)] legato alla radiazione, si presuppone che acceleri la fusione durante la seconda fase del ciclo, e che il periodo accumulo/fusione risulti coerente con i dati reali osservati.

Una volta avviata e conclusa la nuova simulazione, i risultati sono stati soggetti ai medesimi processi della prima calibrazione.

Una prima valutazione immediata positiva è inerente alla coincidenza dei periodi di accumulo e fusione, nonché al medesimo andamento dei valori rispetto sia a quelli osservati, che a quelli provenienti dal metodo base, come dimostrano le Figura 3.6, Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11, Figura 3.12 seguenti

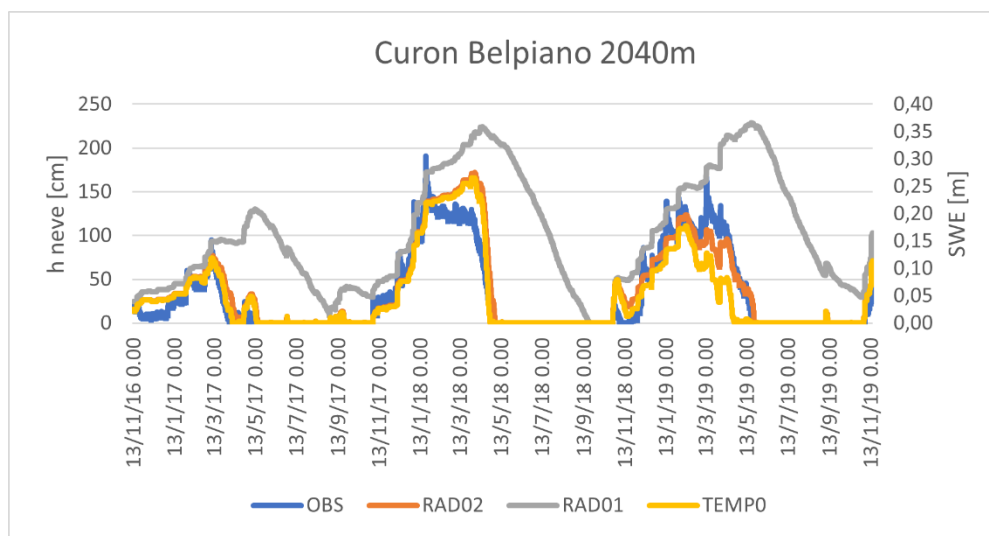


Figura 3.6 Andamento stazione Curon Belpiano

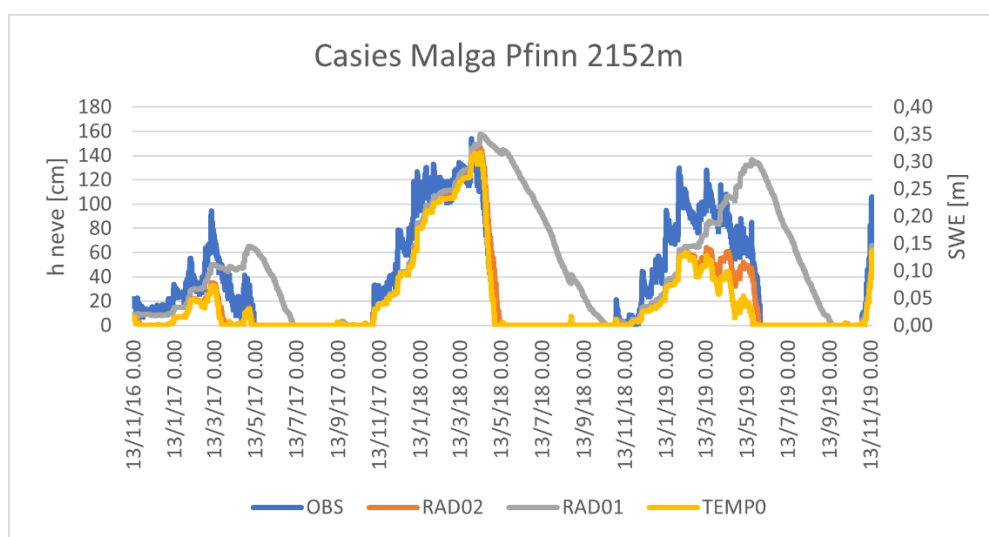


Figura 3.7 Andamento stazione Casies Malga Pfinn

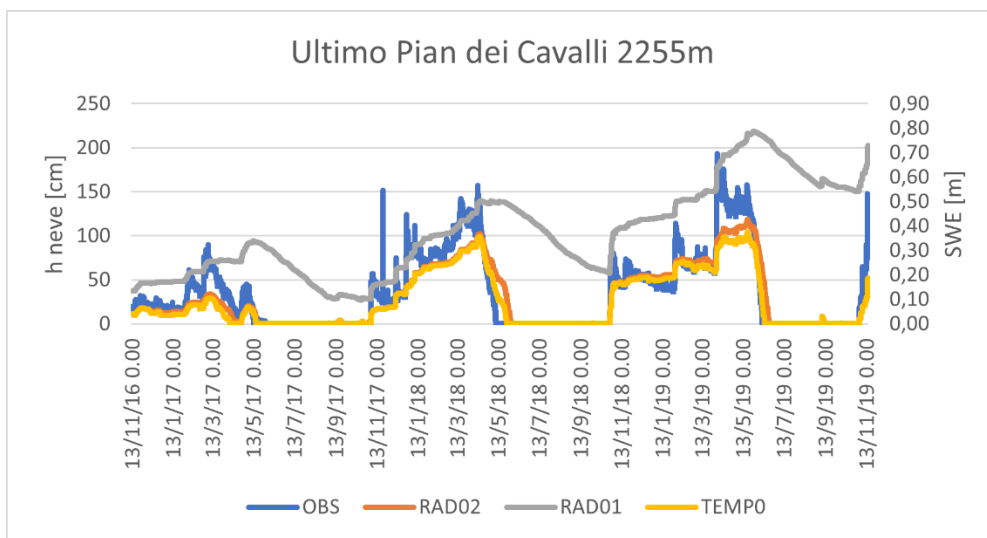


Figura 3.8 Andamento stazione Ultimo Pian dei Cavalli

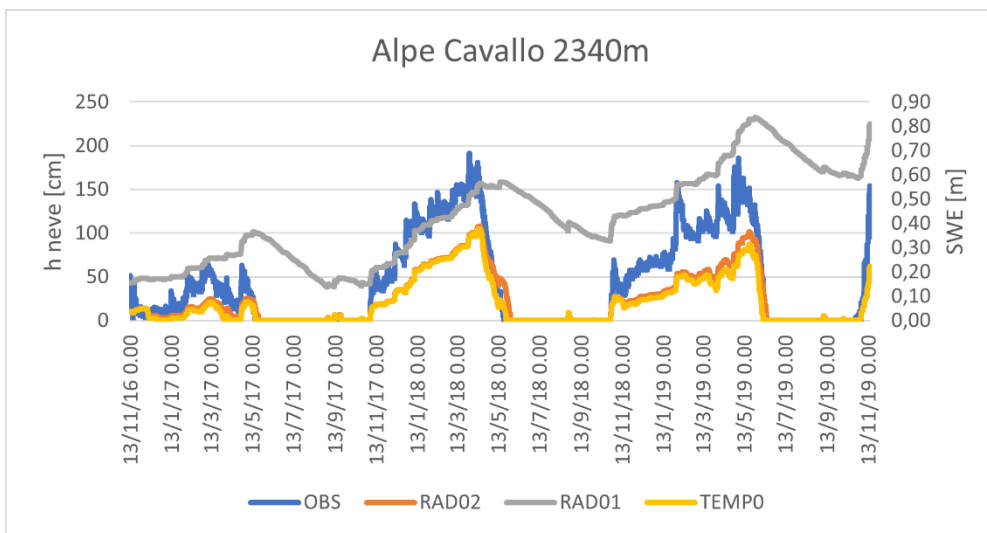


Figura 3.9 Andamento stazione Alpe Cavallo

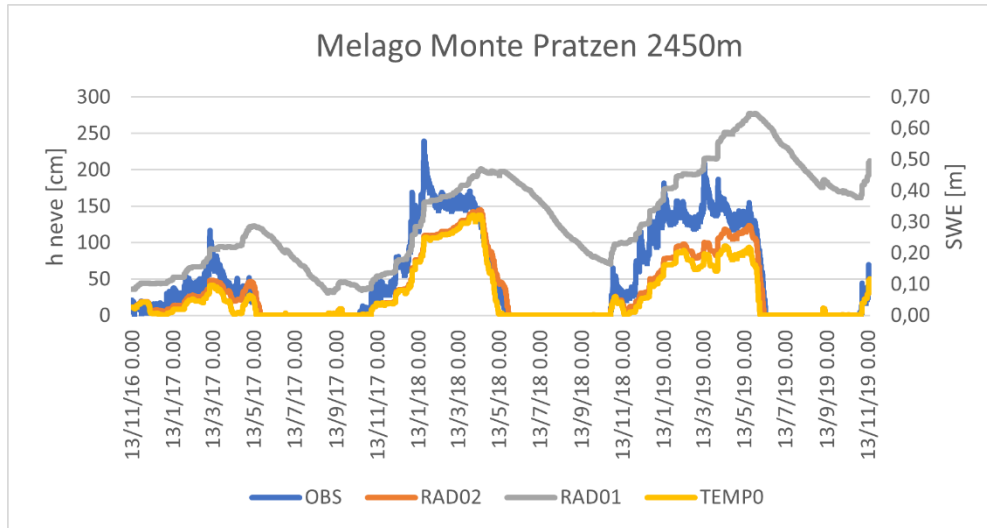


Figura 3.10 Andamento stazione Melago Monte Pratzen

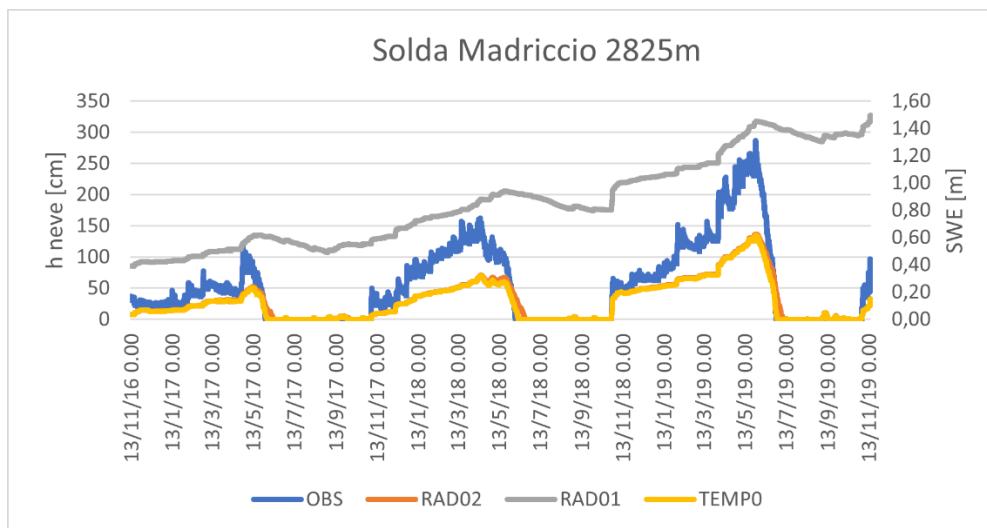


Figura 3.11 Andamento stazione Solda Madriccio

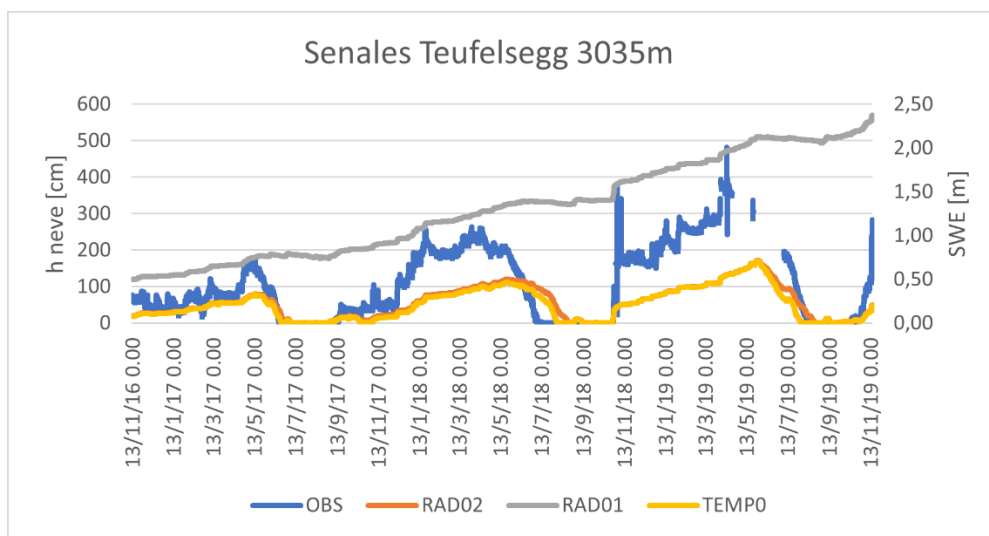


Figura 3.12 Andamento stazione Senales Teufelsegg

Le ipotesi grafiche vengono confermate dalle tabelle di contingenza, i cui risultati generali vengono riassunti nella Tabella 3.3 che segue

		STAZIONI				STAZIONI	
		No neve	Neve			No neve	Neve
Rad02	No neve	227823	21892	Rad02	No neve	0,51	0,05
	Neve	8421	189816		Neve	0,02	0,42

Tabella 3.3 Tabella di contingenza della simulazione Rad02

Nome delle stazioni	Esposizione	Quota	Indice Rad	Indice temp0	% miglioramento / peggioramento
Alpe di Siusi	227	2055	0,88	0,85	3,17
Nova Ponente	271	1470	0,86	0,83	2,90
Curon Belpiano	40	2040	0,97	0,93	3,60
Monte Pratzen	194	2450	0,96	0,94	2,38
Madriccio	279	2825	0,92	0,95	-3,35
Teufelsegg – Giuvo del Diavolo	183	3035	0,87	0,87	-0,73
Senales Finale	157	1950	0,85	0,84	1,87
Alpe del Tumulo	239	2230	0,99	0,99	-0,68
Prati di Plan	312	2015	0,97	0,93	4,26
Pian dei Cavalli	353	2255	0,95	0,97	-1,58
Ladurns	84	1960	0,97	0,93	4,49
Malga Wasserfaller	15	1907	0,97	0,95	1,66
Alpe Cavallo	199	2340	0,95	0,96	-0,31
Malga Pfinn	75	2152	0,96	0,95	0,85
Malga Merbe	270	2006	0,91	0,87	4,73
Malga Fadner	331	2155	0,98	0,96	1,39
Badia Piz La Ila	294	2050	0,88	0,84	4,72
Malga Stutzen	189	2050	0,95	0,91	4,37
Val Tramin	185	2100	0,98	0,96	1,54
Clozner Loch	182	2165	0,90	0,87	3,66
Prati di Croda Rossa	356	1910	0,92	0,88	3,74

Tabella 3.4 Good index confronto simulazione Rado2 e metodo day-degree

A livello generale:

- al 93% il modello è concorde con i dati osservati;
- al 5% vi è stata una sottostima della simulazione;
- al 2% vi è stata una sovrastima.

Procedendo nel dettaglio delle varie stazioni, si può osservare, come riportato nella

Tabella 3.4, che l'indice risulta essere compreso tra 0.85 e 0.99.

Rispetto alla simulazione iniziale, il calcolo orario dello SWE, per ogni cella del territorio, ha evidenziato una miglioria nella fase ciclica di fusione, a prescindere dall'ubicazione delle stazioni.

Un altro punto positivo di questa calibrazione è emerso durante il confronto effettuato con i risultati provenienti dal metodo base, i quali hanno evidenziato un miglioramento fino al 5% per le stazioni comprese nel range di altitudine tra 1.470m

e 2.165m della Tabella 3.4. Invece, per quelle posizionate ad una quota maggiore, si osserva un peggioramento nell'ordine del 1-3%, ma pur sempre riferendosi ad indici elevati (da 0.87 a 0.99).

nomi stazioni	temp 0	rad0 2	Slope Aspect [°]	Quota [m]	Condizione Rad02>Temp0
Nova Ponente	0,83	0,86	270,74	1470,00	VERO
Malga Wasserfaller	0,95	0,97	14,91	1907,00	VERO
Prati di Croda					
Rossa	0,88	0,92	356,35	1910,00	VERO
Senales Finale	0,84	0,85	156,91	1950,00	VERO
Ladurns	0,93	0,97	84,14	1960,00	VERO
Malga Merbe	0,87	0,91	270,00	2006,00	VERO
Prati di Plan	0,93	0,97	312,25	2015,00	VERO
Curon Belpiano	0,93	0,97	39,81	2040,00	VERO
Malga Stutzen	0,91	0,95	189,22	2050,00	VERO
Badia Piz La Ila	0,84	0,88	293,54	2050,00	VERO
Alpe di Siusi	0,85	0,88	226,74	2055,00	VERO
Val Tramin	0,96	0,98	185,22	2100,00	VERO
Malga Pfinn	0,95	0,96	74,74	2152,00	VERO
Malga Fadner	0,96	0,98	330,93	2155,00	VERO
Clozner Loch	0,87	0,90	182,25	2165,00	VERO
Alpe del Tumulo	0,99	0,99	239,30	2230,00	FALSO
Pian dei Cavalli	0,97	0,95	352,75	2255,00	FALSO
Alpe Cavallo	0,96	0,95	199,21	2340,00	FALSO
Monte Pratzen	0,94	0,96	194,33	2450,00	VERO
Madriccio	0,95	0,92	278,82	2825,00	FALSO
Teufelsegg – Giovo del Diavolo	0,87	0,87	183,10	3035,00	FALSO

Tabella 3.5 Stazioni ordinate per quota e ripartite secondo l'esposizione

Riordinando i dati della Tabella 3.5 secondo l'esposizione, si può osservare inoltre che i risultati di 3 delle 6 stazioni poste su versanti esposti a Sud, 2 a Ovest e 1 Nord evidenziano un "peggioramento" nel calcolo dello SWE, con l'utilizzo del modello ad Indice di Temperatura con termine radiativo, rispetto al metodo base.

L'ipotetica relazione che lega esposizione e quota alla stazione non trova conferma dalla Figura 3.13, in cui si è provato a riunire le due variabili oggetto di interrogazione.

Infatti, si può notare che non vi è alcuna concentrazione o disposizione lungo una linea tra le variabili in esame e l'indice di successo della simulazione, anzi il tutto appare casuale.

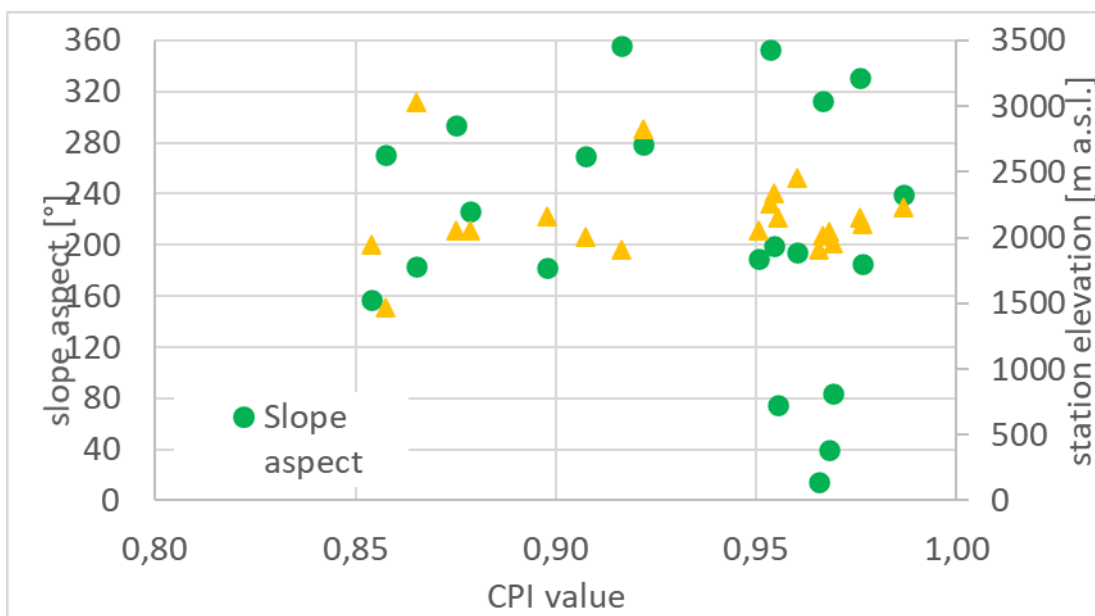


Figura 3.13 Good index relazionato alle variabili esposizione e quota

Indagine circoscritta al ciclo accumulo e fusione nivale.

A seguito di quanto sopra esposto, è stata avviata una seconda indagine, più circoscritta, la quale è stata realizzata aggiungendo, sulle osservazioni inerenti alla

temperatura, un filtro collegato alla quantità oraria di acqua sciolta (SWE) ottenuta dal simulatore.

Il processamento dei dati eseguito nella prima simulazione è stato impiegato in codesta analisi organizzando e raggruppando i risultati all'interno delle tabelle di contingenza, cosicché le ore, in cui era sicuramente presente la fase di accumulo e di fusione, venissero conteggiate.

La temperatura di soglia (T) è stata impostata pari a 1°C; tutti i risultati orari in cui T_a fosse stata al di sotto di T sono stati scartati; mentre i restanti sono stati raggruppati e organizzati nella tabella a doppia entrata.

A seguito di tale raccolta è stato determinato il miglioramento o peggioramento in termini di differenza percentuale, evidenziato nella colonna 5 e 7 della Tabella 3.6

Nomi stazioni	Esposizione	Quota	temp0	T<1	Rad02	T<1
<i>Alpe di Siusi</i>	226,74	2055,00	0,85	-3,37	0,88	-4,16
<i>Nova Ponente</i>	270,74	1470,00	0,83	16,24	0,86	15,78
<i>Curon Belpiano</i>	39,81	2040,00	0,93	1,28	0,97	-0,01
<i>Monte Pratzen</i>	194,33	2450,00	0,94	0,46	0,96	-0,56
<i>Madriccio</i>	278,82	2825,00	0,95	1,20	0,92	-0,76
<i>Teufelsegg - Giovo del Diavolo</i>	183,10	3035,00	0,87	-5,12	0,87	-17,27
<i>Senales Finale</i>	156,91	1950,00	0,84	1,09	0,85	1,35
<i>Alpe del Tumulo</i>	239,30	2230,00	0,99	-1,83	0,99	-1,34
<i>Prati di Plan</i>	312,25	2015,00	0,93	-9,40	0,97	-9,34
<i>Pian dei Cavalli</i>	352,75	2255,00	0,97	-5,27	0,95	-3,74
<i>Ladurns</i>	84,14	1960,00	0,93	-4,32	0,97	-4,63
<i>Malga Wasserfaller</i>	14,91	1907,00	0,95	-1,36	0,97	-4,37
<i>Alpe Cavallo</i>	199,21	2340,00	0,96	-1,14	0,95	0,55
<i>Malga Pfinn</i>	74,74	2152,00	0,95	-6,10	0,96	-6,42
<i>Malga Merbe</i>	270,00	2006,00	0,87	-0,64	0,91	1,25
<i>Malga Fadner</i>	330,93	2155,00	0,96	-11,20	0,98	-9,24
<i>Badia Piz La Ila</i>	293,54	2050,00	0,84	0,99	0,88	-1,11
<i>Malga Stutzen</i>	189,22	2050,00	0,91	-5,95	0,95	-5,58
<i>Val Tramin</i>	185,22	2100,00	0,96	-5,25	0,98	-3,89
<i>Clozner Loch</i>	182,25	2165,00	0,87	-4,78	0,90	-3,70
<i>Prati di Croda Rossa</i>	356,35	1910,00	0,88	-7,78	0,92	-6,52

Tabella 3.6 Confronto risultati simulazioni con dati filtrati

In generale questa analisi ha migliorato solo 5 postazioni secondo l'approccio ad Indice di Temperatura migliorato, tra cui Alpe Cavallo a 2.340 m, esposta a Sud.

Il medesimo filtro applicato al metodo base, invece, ha migliorato 6 collocazioni tra cui Maldriccio a 2.825 m, esposta a Ovest.

3.2.4 Analisi alla scala locale

La fase successiva ha l'obiettivo di comprendere se sussista un margine di miglioramento dell'approccio, tale per cui valga la pena utilizzarlo, visto il gravoso onere computazionale: il tempo per ottenere i risultati è passato, infatti, da circa 5 giorni a quasi 10 giorni con il metodo che include il termine radiativo.

Dai risultati ottenuti dalle ultime analisi eseguite, considerando l'assenza di stazioni alle quote elevate e verificato il "peggioramento" dei risultati nel medesimo range, ci si interroga sul tipo di causa che possa incidere in tale condizione e se il tipo di algoritmo possa essere migliorato o almeno utilizzato in determinate circostanze.

A questo scopo, si sono scelti ulteriori 36 punti di analisi distribuiti per il territorio (vedi Figura 3.14), in cui mutassero le condizioni di esposizione del versante, quota e ombreggiamenti.

Rappresentazione grafica dei punti soggetti ad analisi

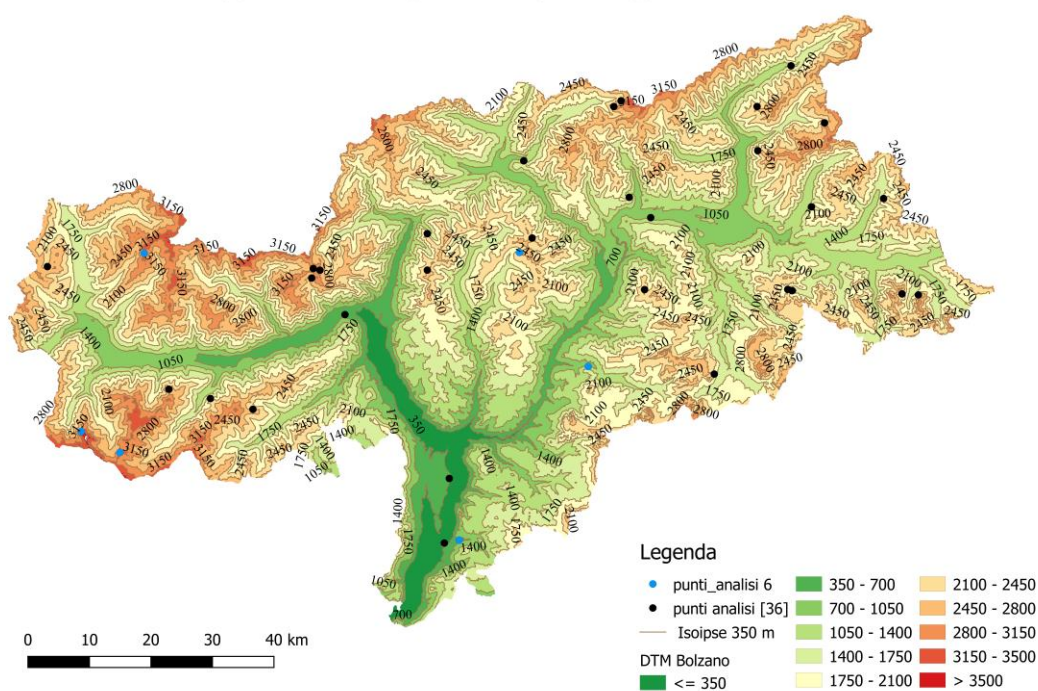


Figura 3.14 Nuovi punti di indagine

Affinché la scelta di essi fosse specifica, è stato impiegato l'utilizzo del programma Qgis, il quale a partire dal Digital terrain model, elabora mappe di pendenza, curve di livello, esposizione (Figura 3.15), ombreggiamenti (Figura 3.16).

Mappa Esposizione dei Versanti

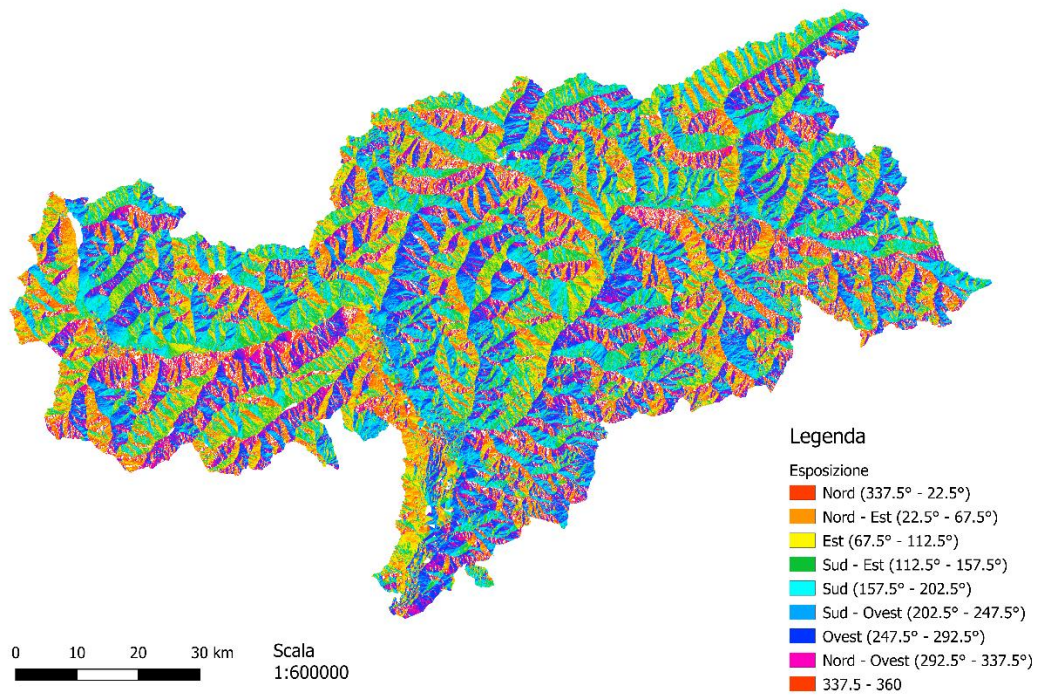


Figura 3.15 Mappa di Esposizione

Ombreggiatura Provincia Autonoma di Bolzano

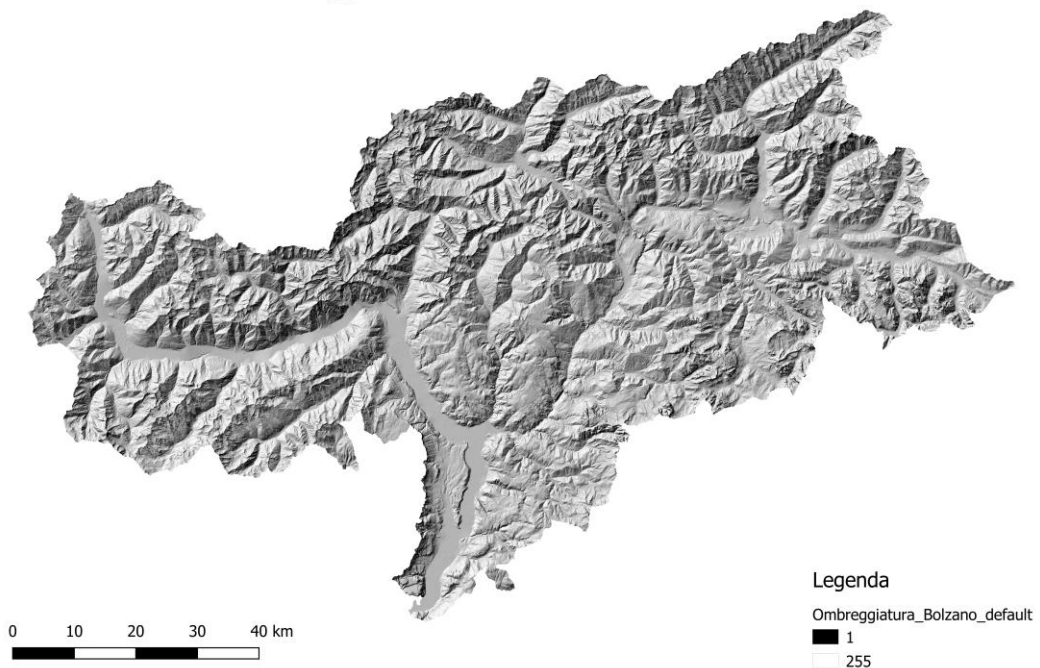


Figura 3.16 Mappa ombreggiamenti

Innanzitutto, sono stati calcolati azimut ed elevazione della provincia autonoma di Bolzano per la giornata del 21 marzo 2017, per ogni ora del giorno, dall'alba al tramonto.

Affinché la scelta delle aree corrispondesse a specifiche condizioni, sono state impiegate combinazioni di algoritmi, a partire da quello per cui l'ombreggiatura fosse elevata per buona parte della giornata.

Definito il primo vincolo, si è proceduto circoscrivendo le zone, in cui l'esposizione variasse secondo la direzione dei punti cardinali: Nord, Sud, Est ed Ovest; infine, è stata individuata come terza limitazione, la variazione della quota.

Queste tre combinazioni hanno determinato, con le relative coordinate, i 36 punti, i quali sono stati inseriti nel modello e di cui sono stati ottenuti i risultati secondo entrambi gli approcci.

Dei 36 punti, solo 6 (quelli in blu della Figura 3.14), di questi hanno evidenziato uno sfasamento nella fase di fusione nel tempo; come evidenzia, nella Figura 3.17, il punto 02.

Sebbene si possa notare un discostamento minimo durante la fase di accumulo (verificabile in termini di SWE cumulati nel grafico appartenenti alla Figura 3.18), esso diventa decisamente consistente nella fase della fusione collocato nella prima parte di gennaio. Infatti, se il metodo Degree-day simula la conclusione della fusione nivale intorno al 16/02, l'altro approccio simula la fine al 24/02. Questo divario, evidenziato in termini di sfasamento temporale, viene addizionato anche dal gap dello SWE cumulato nella Figura 3.18

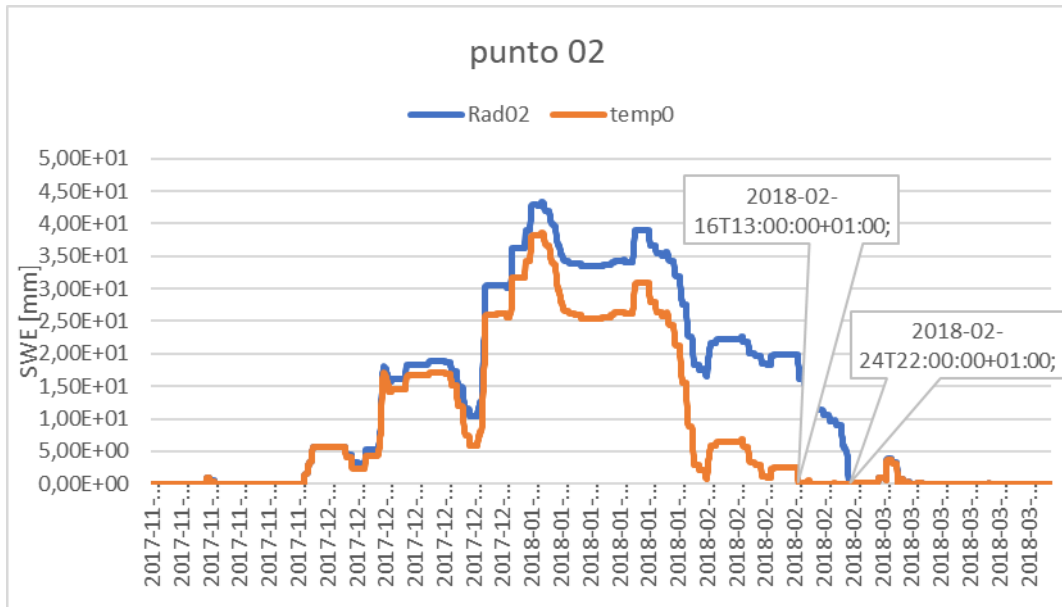


Figura 3.17 Andamento SWE Punto 02 calcolato con Rado2 e tempo

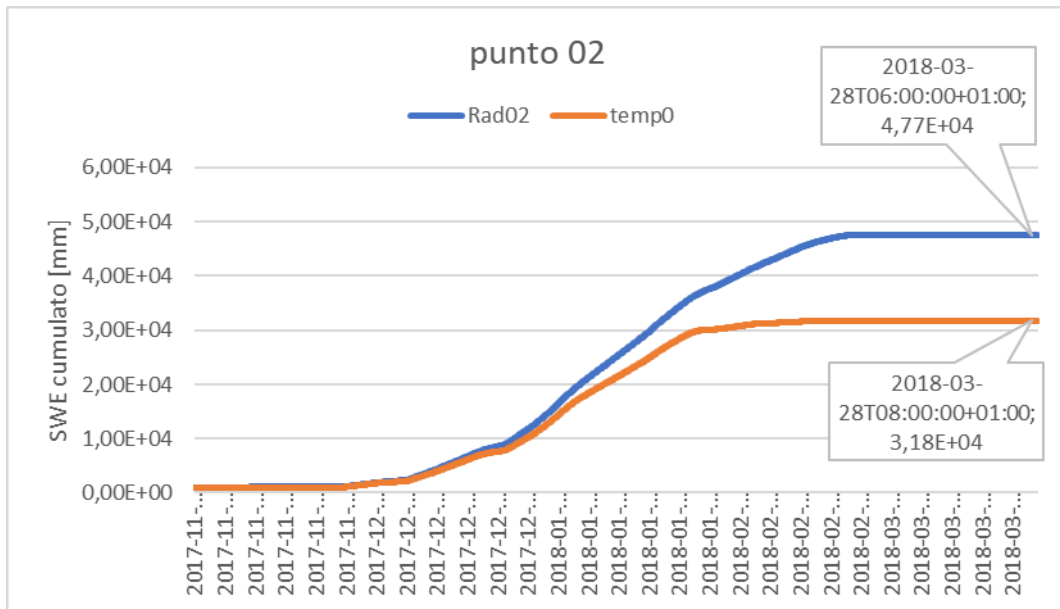


Figura 3.18 Andamento SWE cumulato del Punto 02 calcolato con Rado2 e tempo

La stessa situazione è stata riscontrata nel punto 06 (Figura 3.19), dove si può osservare:

- uno scostamento temporale durante la fase di fusione nivale, in entrambi gli anni 2017 e 2018;
- un distacco nella fase di accumulo del ciclo ottobre 2017 - settembre 2018, causato dall'ultima serie avvenuta tra agosto 2018, fino a ottobre 2018.

Dalla Figura 3.20 è possibile confermare che anche in questo caso l'accumulo di SWE, vale a dire la quantità equivalente di neve in acqua fusa, è diverso a seconda dell'approccio considerato.

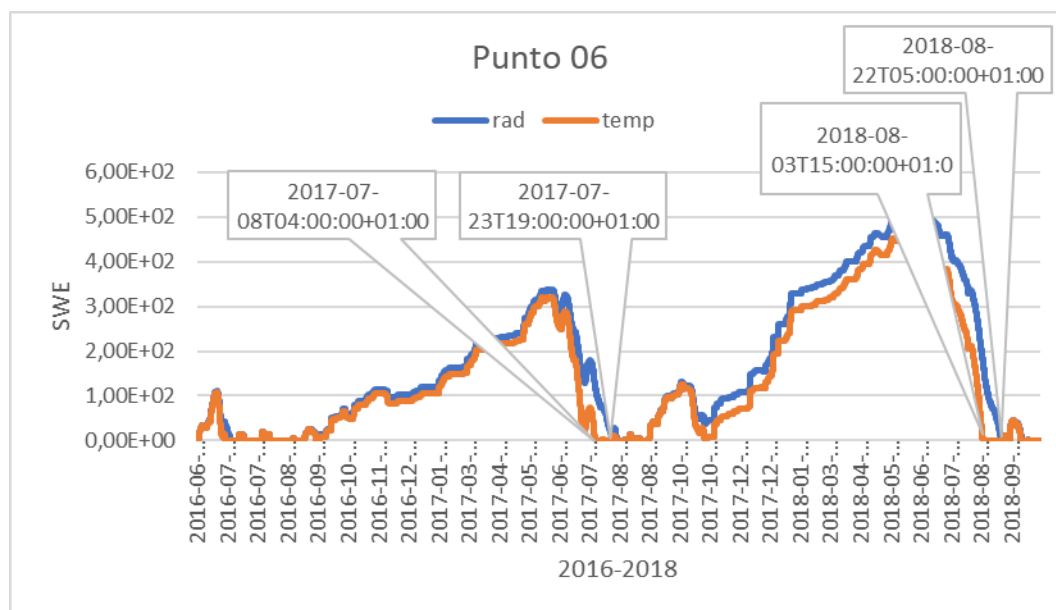


Figura 3.19 Andamento SWE cumulato del Punto 06 calcolato con Rado2 e tempo

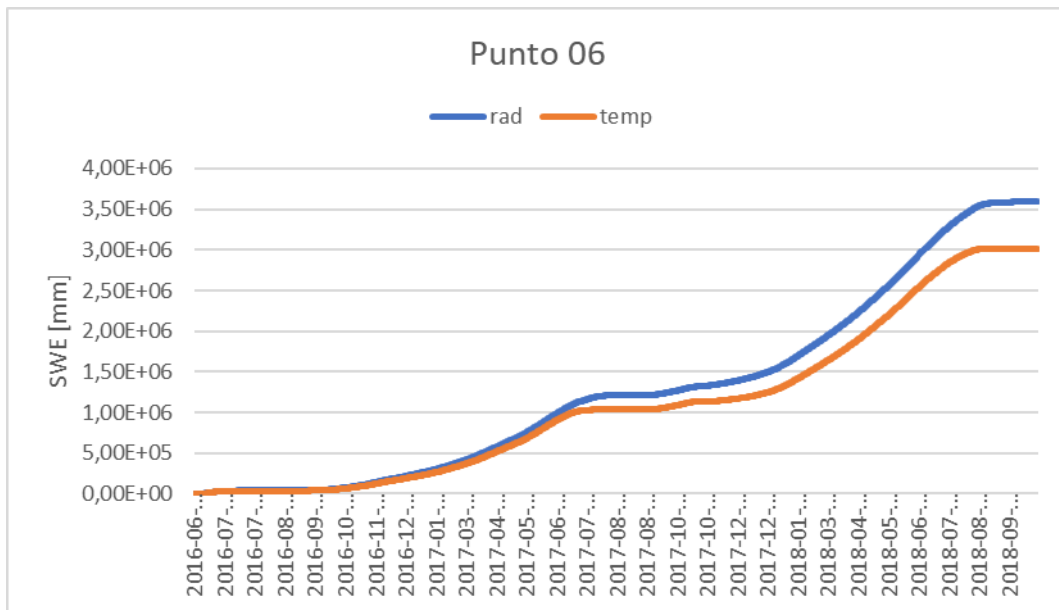


Figura 3.20 Andamento SWE cumulato del Punto 06 calcolato con Rad02 e tempo

3.2.5 Confronto SWE a livello globale

In quest'ultima indagine, lo SWE è stato calcolato non a livello locale, ma su aree aventi dimensioni differenti, come per esempio Lagoverde, che misura poco più di 6 Km², fino a Bolzano che, ricopre quasi l'intera area.

All'interno della Tabella 3.7, per ogni simulazione, sono stati riportati, rispettivamente per ogni area, i valori di SWE, cumulati per l'intervallo di tempo che va da novembre 2016 a novembre 2019, con e senza termine radiativo.

Infine, si è calcolato la differenza percentuale, come riportato nell'ultima colonna della Tabella 3.7

	AREA [KM ²]	SWE_CUM RAD02 [MM]	SWE_CUM TEMPO	DIFFERENZA %
LAGOVERDE	6,15	5,67E+06	5,23E+06	8,5%
LAGOPESCE	8,96	3,81E+06	3,53E+06	8,0%
NEVES	34,63	3,72E+06	3,43E+06	8,3%
GIOVARETTO	106,33	4,25E+06	3,90E+06	9,1%
VERNAGO	146,02	3,58E+06	3,25E+06	9,9%
SANVALENTINO	166,95	2,97E+06	2,71E+06	9,5%
ZOCOLO	176,96	2,13E+06	1,94E+06	10,0%
MONGUELFO	370,82	1,10E+06	1,00E+06	10,0%
BOLZANO	7446,37	1,42E+06	1,29E+06	10,4%

Tabella 3.7 Confronto SWE cumulato per aree

Si può osservare che con entrambe le simulazioni si sono ottenuti valori dello stesso ordine di grandezza e che la differenza percentuale si discosta tra l'8.5% e il 10.4%.

La sottostante Figura 3.21 mostra come gli andamenti sono simili e che tendono ad avvicinarsi all'aumentare dell'area.

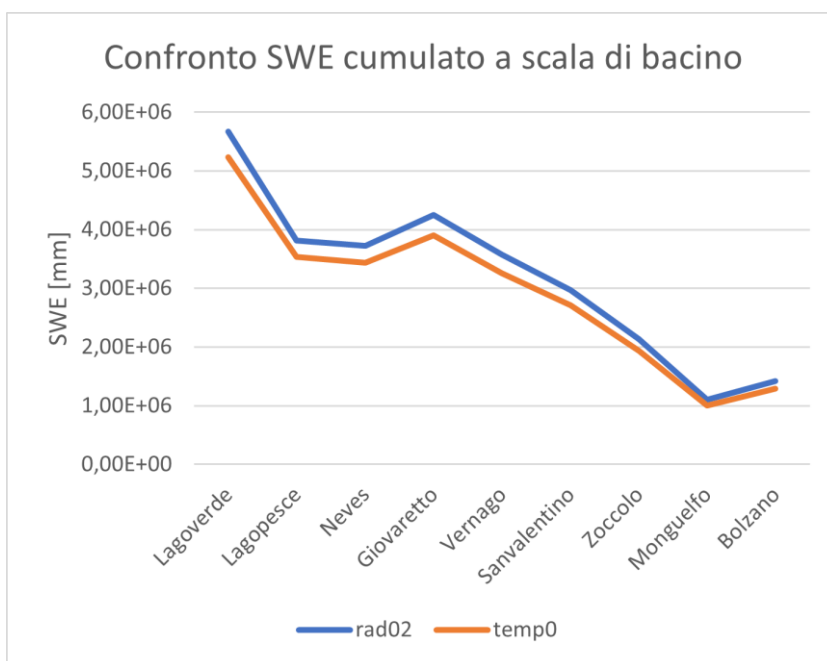


Figura 3.21 Andamento SWE cumulato, ordinato per area crescente

CONCLUSIONI

L'approccio ad Indice di Temperatura migliorato, confrontato con il metodo Degree-Day, ha calcolato quantitativi di equivalente idrico nivale dello stesso ordine di grandezza; i cicli di accumulo e fusione nivale, confrontati con i valori osservati, coincidono, quindi, la calibrazione del parametro alfa legato alla radiazione, ha avuto successo con un good index compreso tra 0.85 e 0.99.

Di conseguenza si conviene che utilizzando i metodi sopracitati, si ottengono risultati attendibili.

Durante le indagini che sono susseguite alla calibrazione, sono emersi i seguenti aspetti:

- l'onere computazione impiegato per la calibrazione è raddoppiato rispetto all'approccio base, passando da circa 5 giorni con il metodo Degree-Day, a 10 giorni con il metodo Degree-Day Enhanced;
- non è stato possibile identificare una relazione tra quota ed esposizione della stazione con l'indice good index;
- a scala puntuale, l'analisi contenente la componente radiativa si è scostata da quella base, sia in termini di sfasamento temporale, sia di ordine di grandezza dello SWE;

- l'analisi condotta su aree grandi ha mostrato una differenza minima in termini di SWE medio cumulato.

Per i motivi esposti, si deduce che l'analisi includente il termine radiativo è conveniente, a condizione che si voglia analizzare un singolo punto, dato l'onere computazionale gravoso.

Per indagini a livello di bacino idrografico, vista la possibilità di ottenere risultati validi in termini di SWE con il metodo base, ci si può affidare al metodo più semplice, che richiede meno tempo e meno dati in ingresso.

Riferimenti bibliografici

- [1] Cazorzi F., Dalla Fontana G., “Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index”, *Journal of Hydrology*. n. 181, pp. 169-187, 1996
- [2] Casorzi F., Carturan L., Dalla Fontana G., “Simulazione della fusione in ambiente glaciale con un modello distribuito ad indice morfoenergetico”, *l'Acqua* 3/2005
- [3] Kustas, W., Rango, P. and Uijlenhoet, A., “A simple budget algorithm for the snowmelt runoff model”. *Water Resources Research*, 30(5): 1515-1527, 1994.
- [4] Lang, H. and Braun, L.. On the information content of air temperature In the context of snow melt estimation. *International Association of Hydrological Sciences Publication 190 (Workshop at Štrbské Pleso, Czechoslovakia 1988 – Hydrology of Mountainous Areas)*, 347–354, 1990.
- [5] Martinec, J.: The degree-day factor for snowmelt-runoff forecasting, *IAHS Publication, No. 51, Surface Waters*, in: *IUGG General Assembly of Helsinki, Helsinki, Finland*, 468–477, 1960
- [6] Ohmura, A.,. Physical basis for the temperature-based meltindex method. *J. Appl. Meteorol.* 40, 753–761, 2001
- [7] Regine Hock, “Temperature index melt modelling in mountain areas”, *Journal of Hydrology*, Vol. 282, Issues 1–4, Pages 104-115, 2003
- [8] Swift, L.W.,. Algorithm for solar radiation on mountain slope. *Water Resources Research* ,12(1): 108-112, 1976
- [9] Tarquini S., Isola I., Favalli M., Battistini A. (2007) TINITALY, un modello digitale di elevazione dell'Italia con una dimensione di cella di 10 m (Versione 1.0) [Set di dati]. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV). <https://doi.org/10.13127/TINITALY/1.0>."
- [10] Un modello di bilancio idrologico per bacini idrografici con topografia complessa, trattamento dei dati meteorologici per topografie complesse, Martinelli

- [11] I modelli di calcolo implementati, Salandin
- [12] <https://meteo.provincia.bz.it/>
- [13] <https://ambiente.provincia.bz.it/acqua/utilizzo-risorse-idriche.asp>
- [14] <https://www.vivosuedtirol.com/it/meteo/clima/>

