



**POLITECNICO
MILANO 1863**

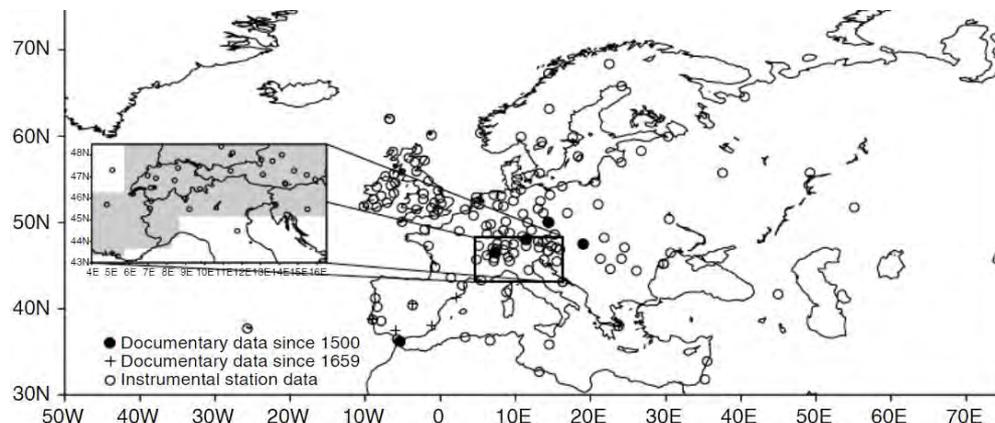


I ghiacciai alpini: un hotspot del cambiamento climatico

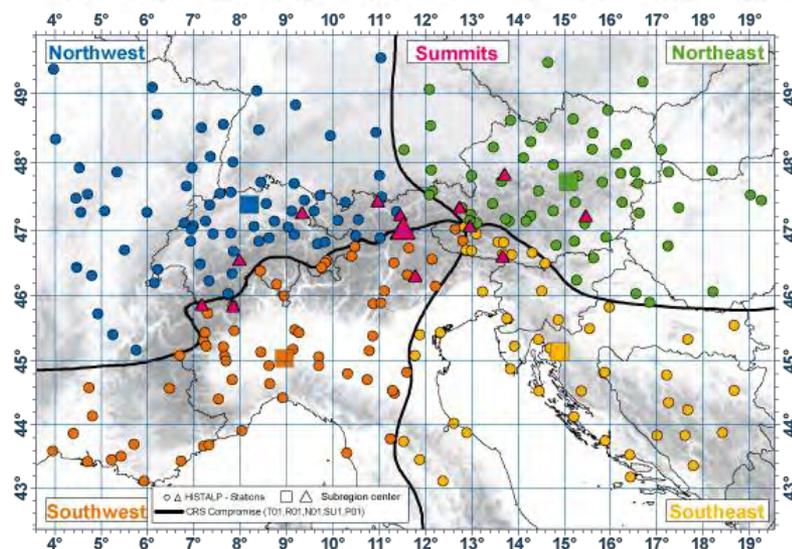
Leonardo Stucchi, dottorando in Ingegneria Ambientale e delle Infrastrutture al Politecnico di Milano

Perché studiare le Alpi

Sebbene i ghiacciai alpini siano relativamente poco estesi, la loro collocazione al centro del continente europeo ha reso le Alpi l'area montana con maggiore concentrazione di dati meteo e documenti storici sullo stato dei ghiacciai.



(Casty et al., 2005)

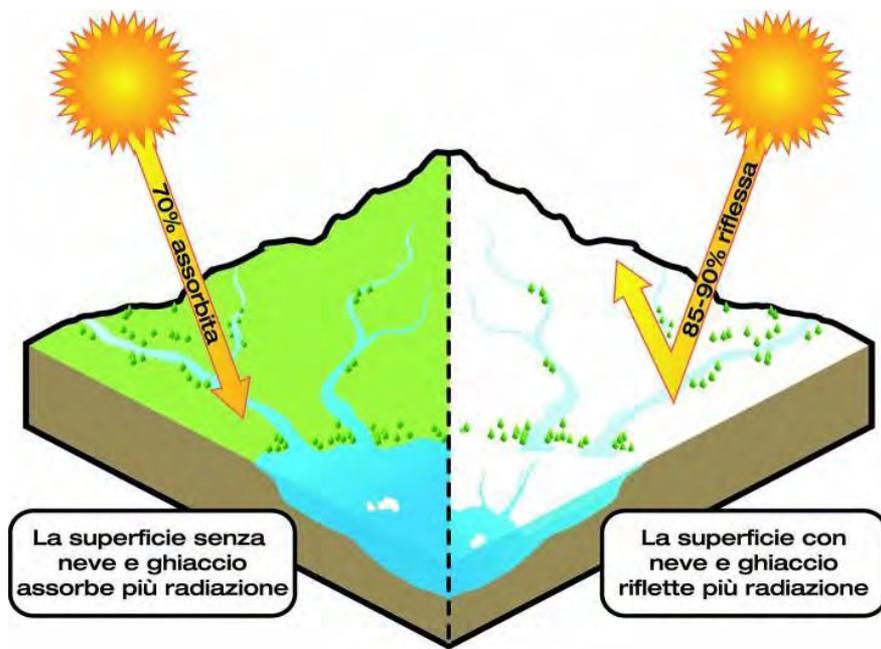
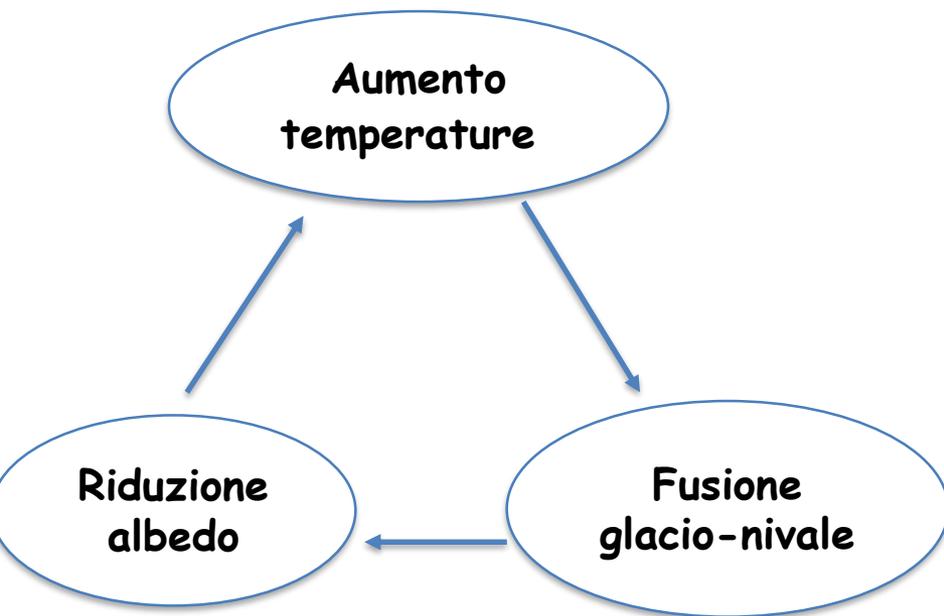


In archivio open source HISTALP sono disponibili serie complete di dati meteo per regione alpine (GAR) da 1760 a oggi.

Cambiamenti climatici e Alpi

L'aumento medio di temperature globale nel XX secolo è stato di 0.9 C° , mentre per l'area alpina di 1.4 C° .

Questo fenomeno è almeno in parte riconducibile all'Elevation Dependant Warming, molto studiato per l'altopiano tibetano.



Ritiro dei ghiacciai alpini dalla fine della Piccola Era Glaciale a oggi

Grazie ad archivio dei ghiacciai svizzero si è potuto stimare il ritiro dei ghiacciai alpini dal 1850 a 2000 pari al 49% (da 4474 a 2272 km²) con perdita di volume ancora più significativa (Zemp et al., 2008).
Da anni '80 il ritiro sta accelerando...



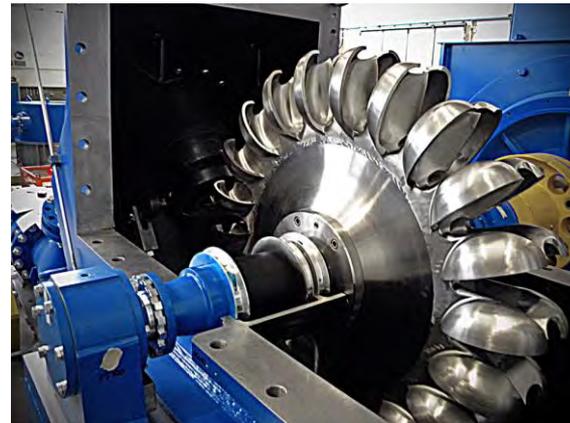
Il ghiacciaio dei Forni: foto del ritiro più proiezione per il 2050

Quali conseguenze?



Ex rifugio Scerscen, alta Valmalenco, costruito negli anni '80 per lo sci d'alpinismo sul'omonimo ghiacciaio e ora abbandonato a causa del ritiro dello stesso.

I ghiacciai alpini contribuiscono alla portata dei torrenti montani nei mesi estivi. La loro scomparsa impatta negativamente su agricoltura, turismo, ecosistemi fluviali e produzione di energia idroelettrica.



Turbina Pelton, tipica degli impianti idroelettrici alpini



Trota Fario, una delle specie più minacciate dal rialzo delle temperature (Fa Caldo Sul Serio)

Caso di studio: Il ghiacciaio del Sabbione, Val Formazza (VB)

Diga appositamente costruita nel 1953 per raccogliere acqua di fusione glaciale per produrre energia idroelettrica. La sua costruzione è stata immortalata in un documentario del regista Ermanno Olmi.



Era la diga più ad alta quota in Europa e la seconda per volume d'invaso (44 ml³).



Il lago formatosi ha coperto parte del ghiacciaio accelerando la dinamica di ritiro già in atto.

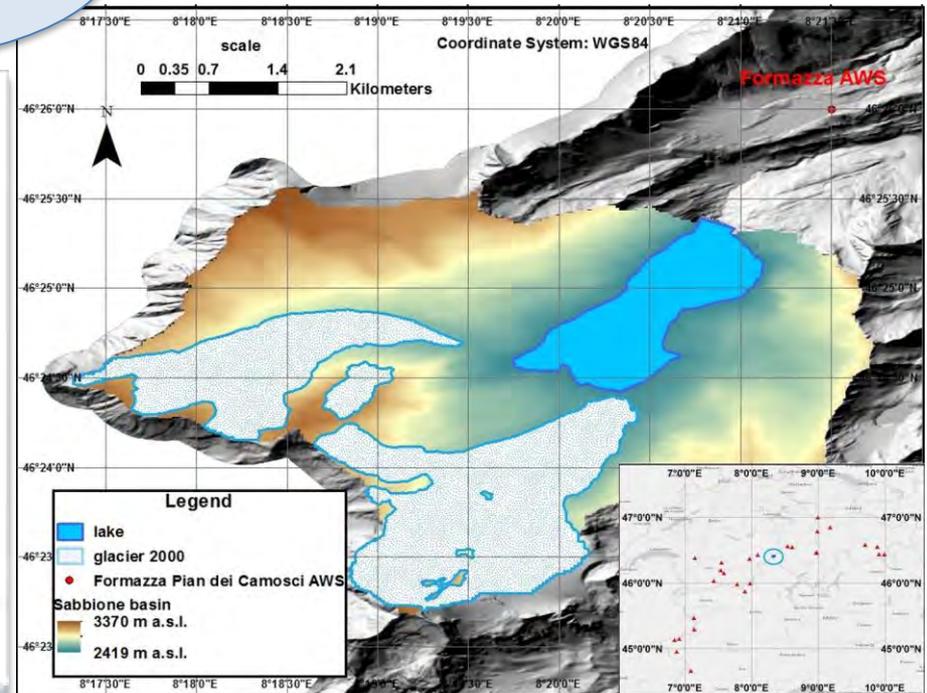
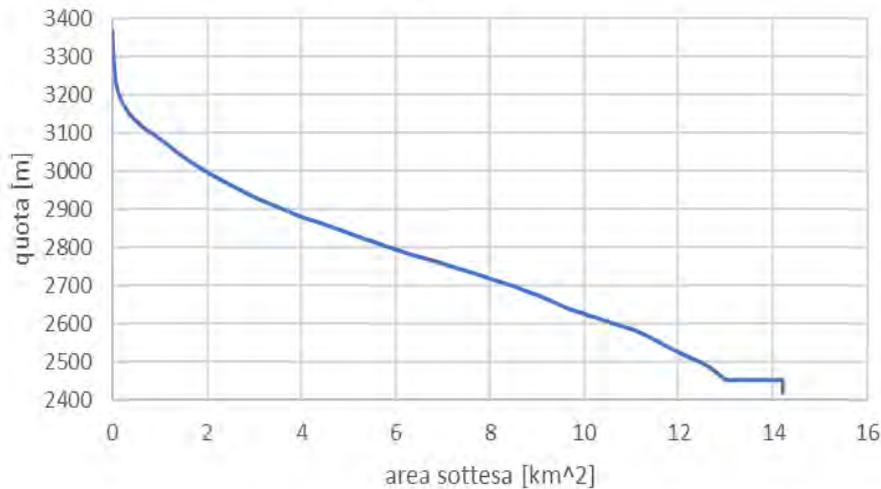
Studio idrologico del bacino

Delimitazione
bacino idrologico
del Sabbione

Modello idrologico
di portate al lago
(2000-2017)

Dati di
temperatura e
precipitazione

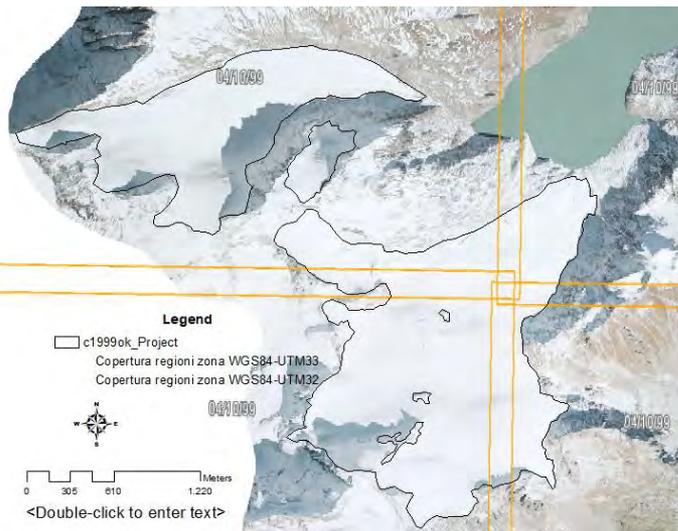
curva ipsografica bacino



A: 14.5 km² Max alt: 3374 m a.s.l. Min alt: 2454 m a.s.l.

Dati di area e di ablazione del ghiacciaio

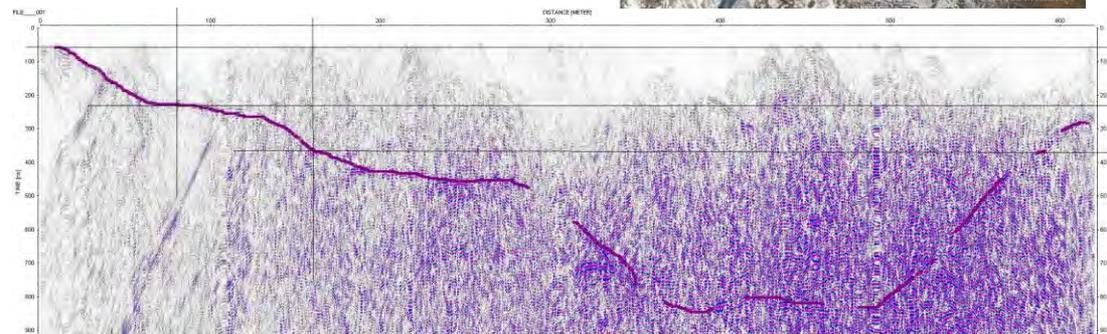
Ortofoto e immagini satellitari (2000-2017)



Paline ablative (perdita spessore)



Tracce GPR (misure spessore)



Modello Poly-Hydro

✓ Semi-distribuito per cella: risoluzione 25 m, scala temporale giornaliera

- **Bilancio di contenuto d'acqua del terreno:**

$$S^{t+\Delta t} = S^t + P + M_i + M_s - ET - Q_g$$

Ossia:

S = Contenuto d'acqua del terreno [mm]

P = precipitazione (pioggia/neve)

M_s = fusione nivale

M_i = fusione glaciale

ET = Evapotraspirazione

Q_s = deflusso superficiale

Q_g = deflusso sotterraneo

T = Temperature

- **Deflusso superficiale:**

$$\begin{cases} Q_s = S^{t+\Delta t} - S_{MAX} & \text{se } S^{t+\Delta t} > S_{MAX} \\ Q_s = 0 & \text{se } S^{t+\Delta t} \leq S_{MAX} \end{cases}$$

- **Deflusso sotterraneo:**

$$Q_g = K \left(\frac{S}{S_{MAX}} \right)^{k_g}$$

- **Evapotraspirazione (Potenziale): Hargreaves**

$$ET = E_s + T_s$$

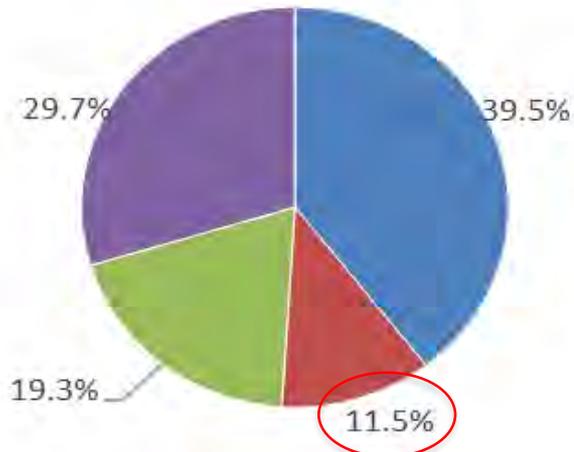
- **Fusione glacio-nivale: modello misto (T, radiazione) degree-day**

$$M = \begin{cases} TMF \cdot (T - T_{critica}) + RMF \cdot H_G(1 - \alpha) & \text{se } T > 0 \\ 0 & \text{se } T \leq 0 \end{cases}$$

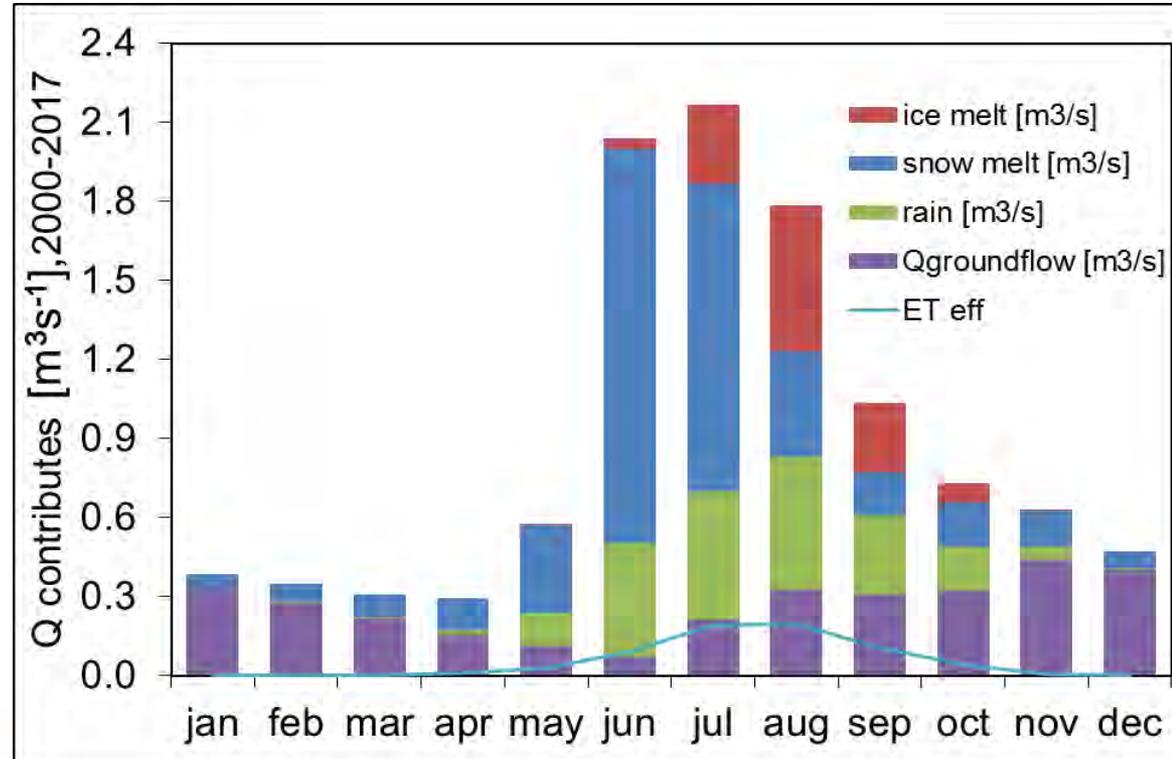
Risultati modello idrologico

Modello *Poli-Hydro* simula ritiro ghiacciaio e portata idrologica al lago

CONTRIBUTI MEDI PORTATA



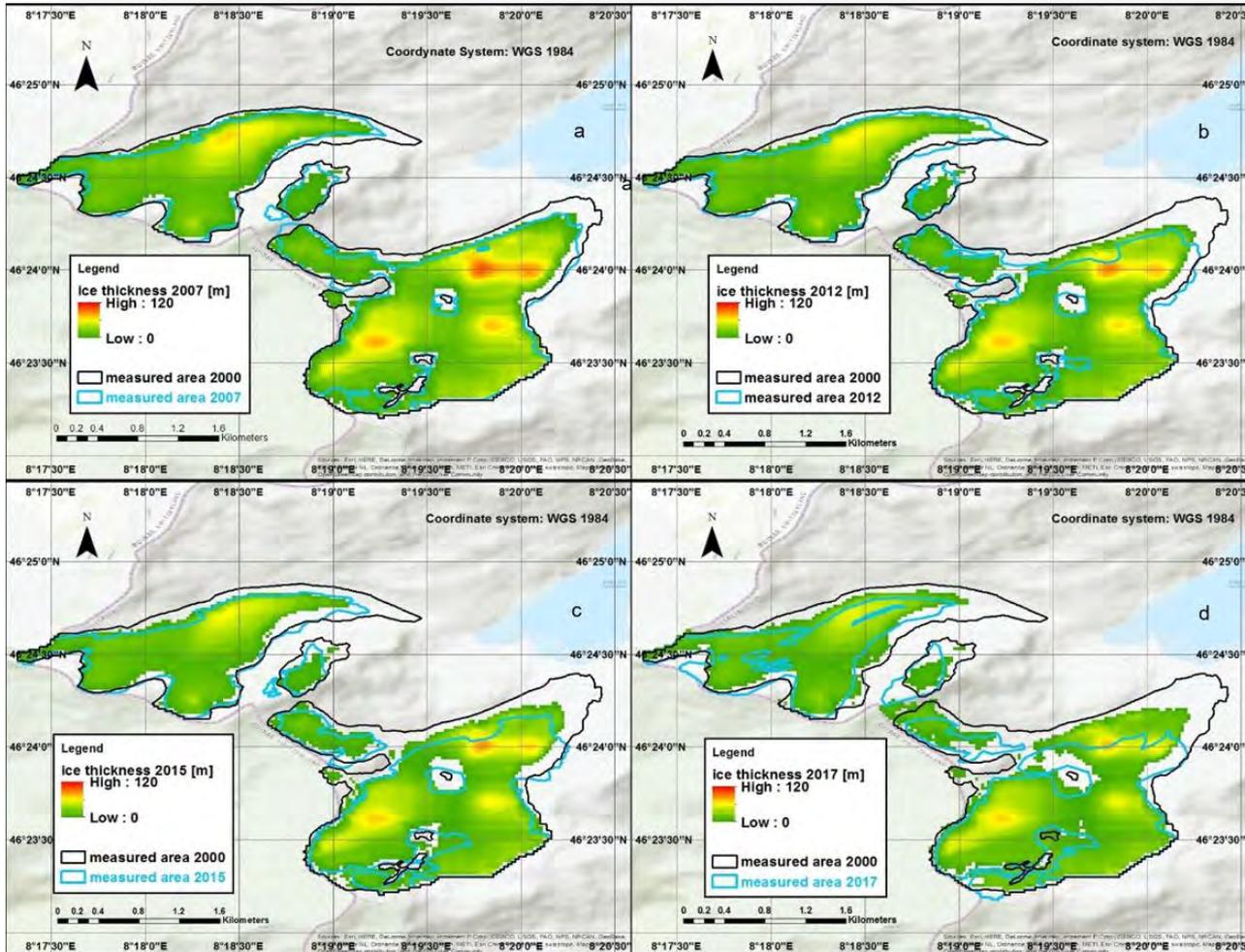
- fusione nivale [m³/s]
- fusione glaciale [m³/s]
- pioggia [m³/s]
- Portata sotterranea [m³/s]



Picco di portata nei mesi estivi dovuti a fusione prima nivale e poi glaciale

Evoluzione del ghiacciaio simulata

Area misurata del Sabbione passa da 4.23 a 2.71 km². Poly-Hydro stima un'area finale di 2.94 km² (8% di errore).



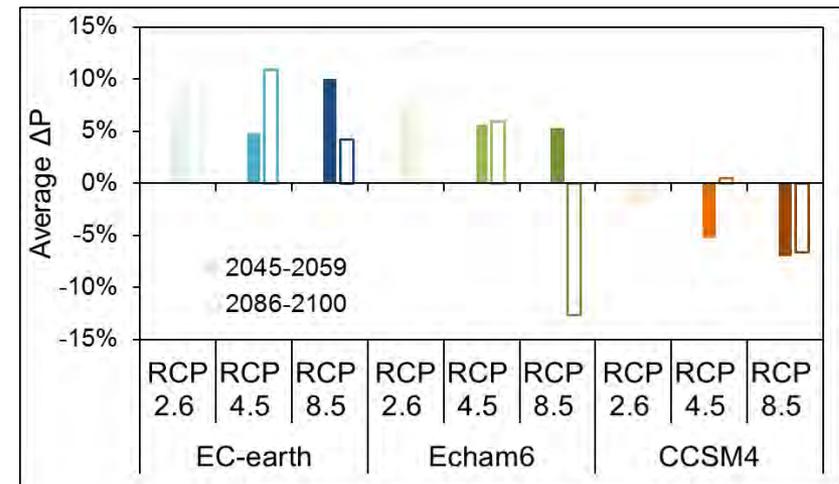
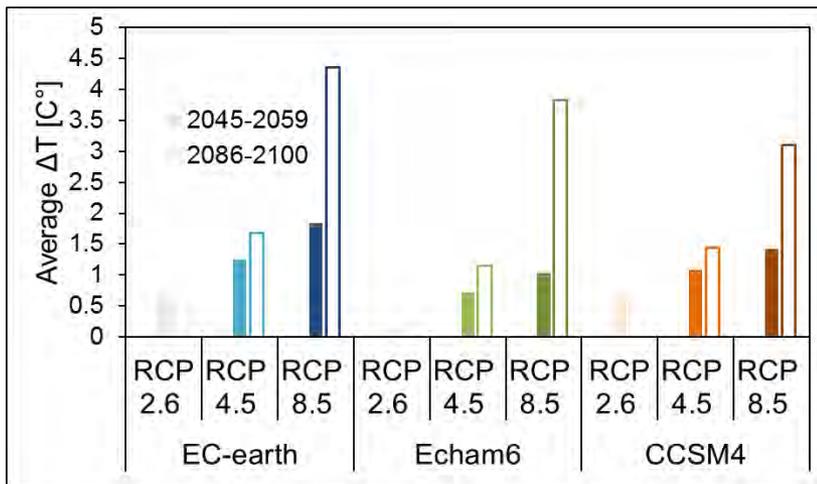
In figura area del ghiacciaio misurata e modellata per 2007-2012-2015-2017 (rispettivamente in azzurro e scala di verde e rosso) + area iniziale per 2000 (in nero)

Scenari climatici futuri (2018-2100)

3 modelli climatici usati da IPCC
(ECHAM6, CCSM4, EC-EARTH)

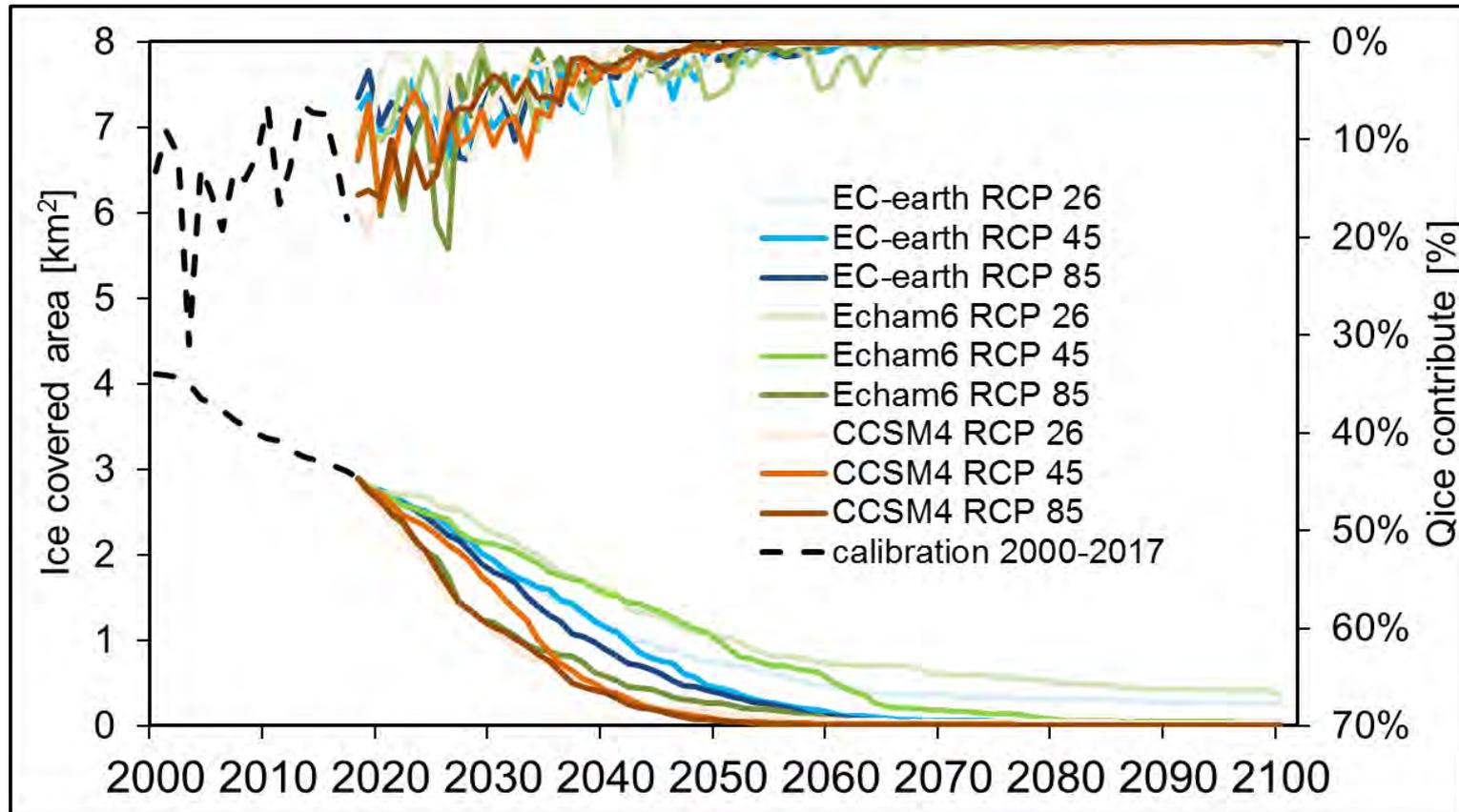
3 ipotesi di aumento
concentrazione gas serra (rcp
2.6, 4.5 e 8.5)

9 scenari



Variazioni di temperatura e precipitazione per ogni modello a metà e fine secolo

Il ghiacciaio del Sabbione nel XXI secolo



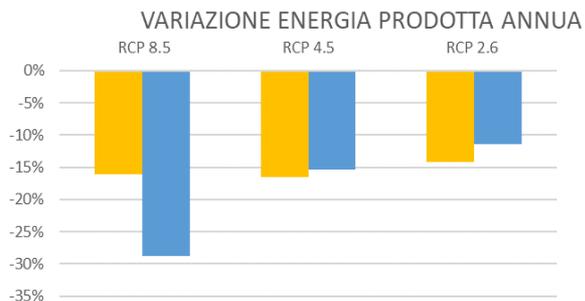
Variatione aria ghiacciaio e contributo % di fusione glaciale alla portata (asse destra), in nero modello per periodo di calibrazione e nella scala di colori secondo 9 scenari GCM.

Variazioni di portata

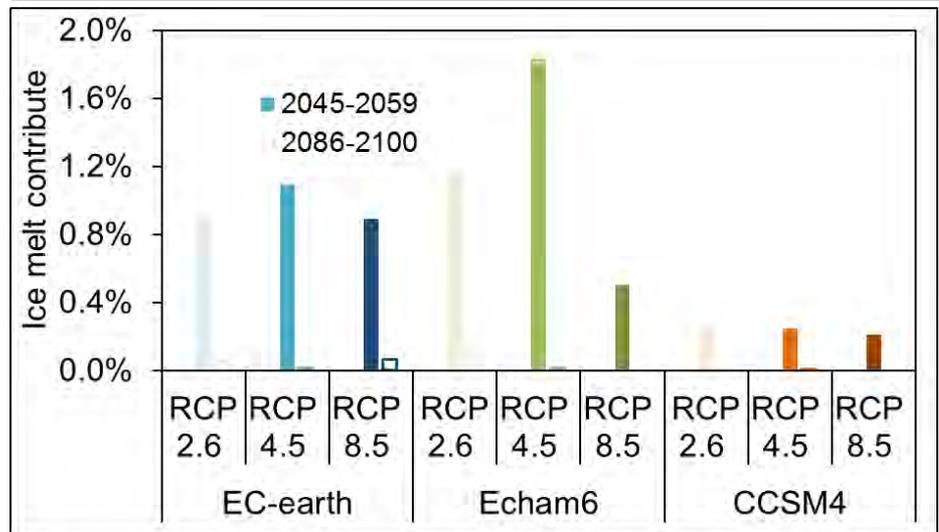
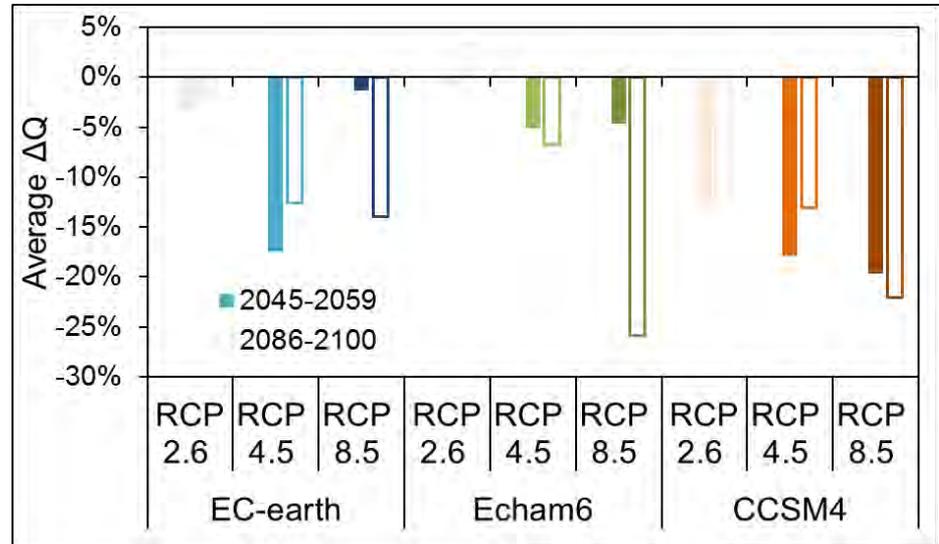
Portata diminuisce in quasi tutti gli scenari causa aumento evapotraspirazione, scomparsa ghiacciaio.

Contributo del ghiacciaio alla portata diventa nullo in tutti gli scenari.

Produzione energia diminuisce



■ variazione 2045-59 ■ variazione 2086-2100



CASO STUDIO 2

✓ Bacino della Valmalenco (Torrente Mallero), Lombardia, Italia Settentrionale.



CARATTERISTICHE DEL SITO

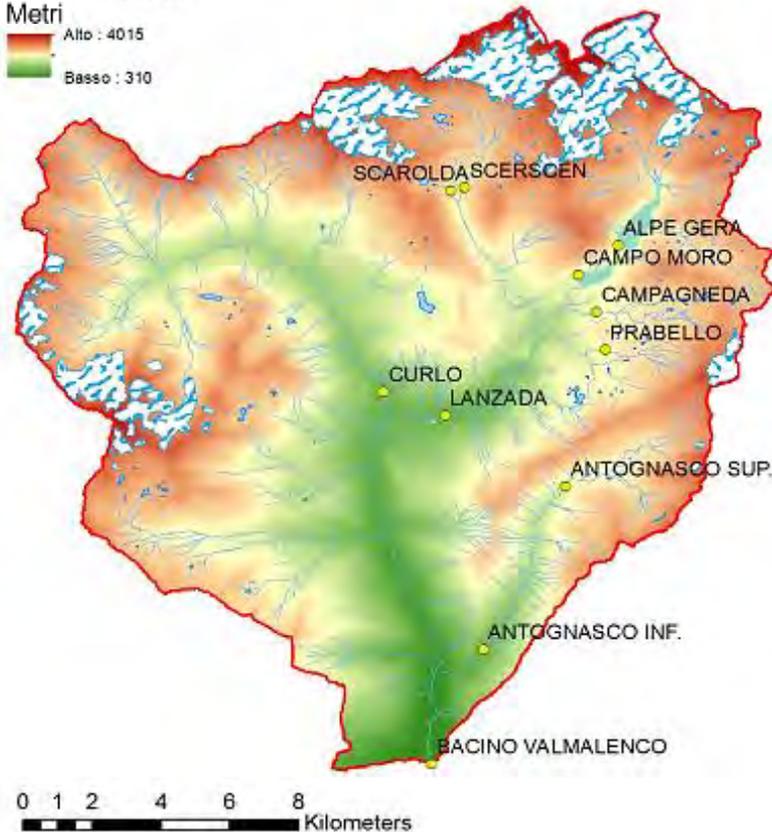
Legenda

- Sezioni di chiusura
- Bacino Valmaenco
- Laghi Valmaenco
- Invasi Valmaenco
- Reticolo Idrico Valmaenco
- Ghiacciai Valmaenco 2013

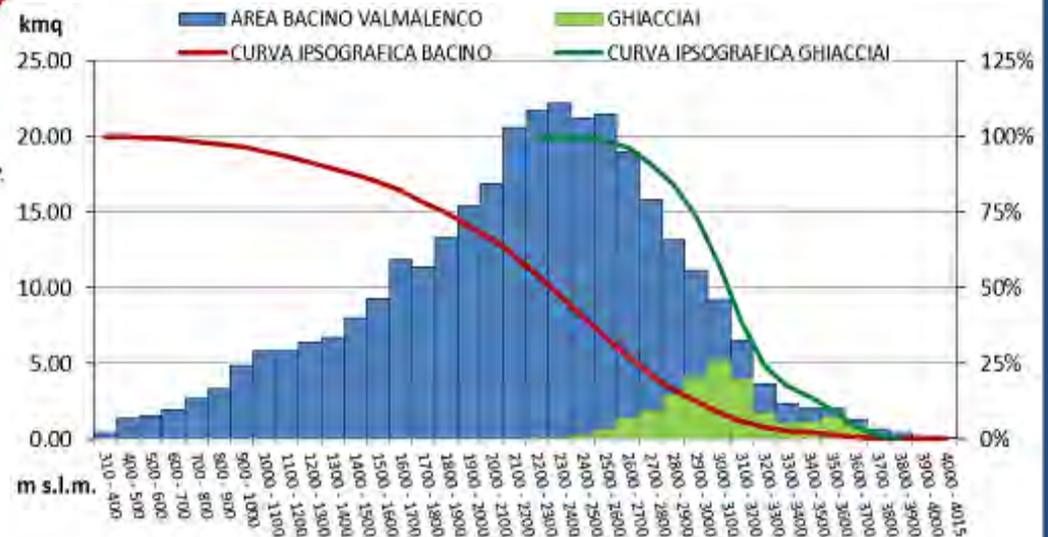
DTM Valmaenco

Metri

- Alto : 4015
- Basso : 310

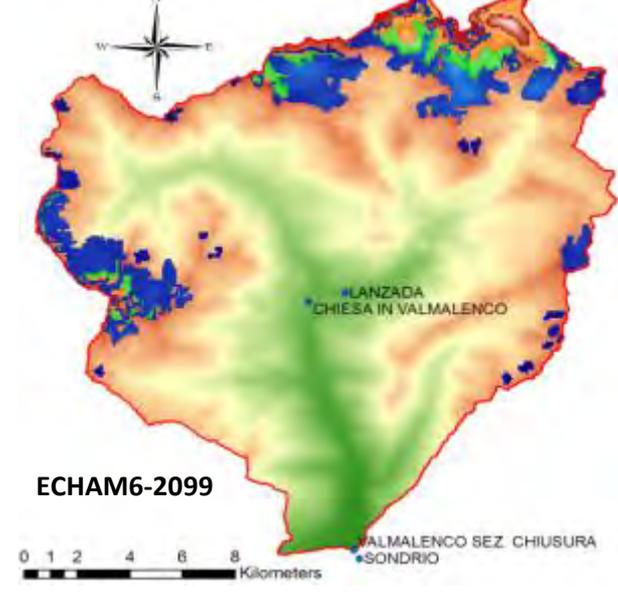
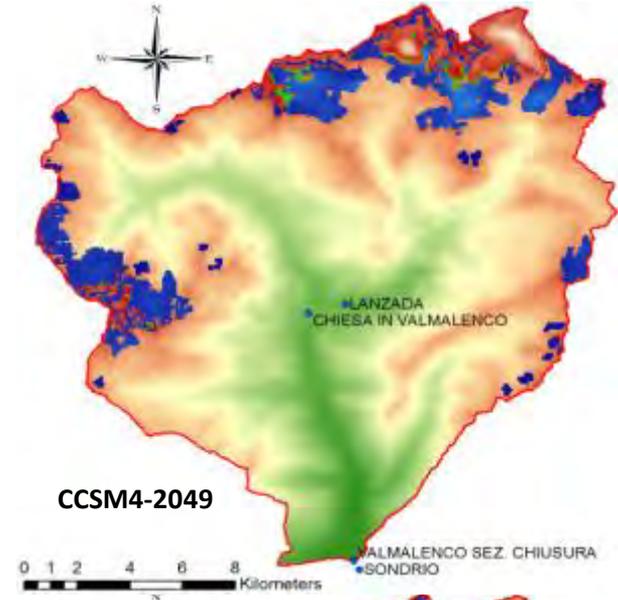
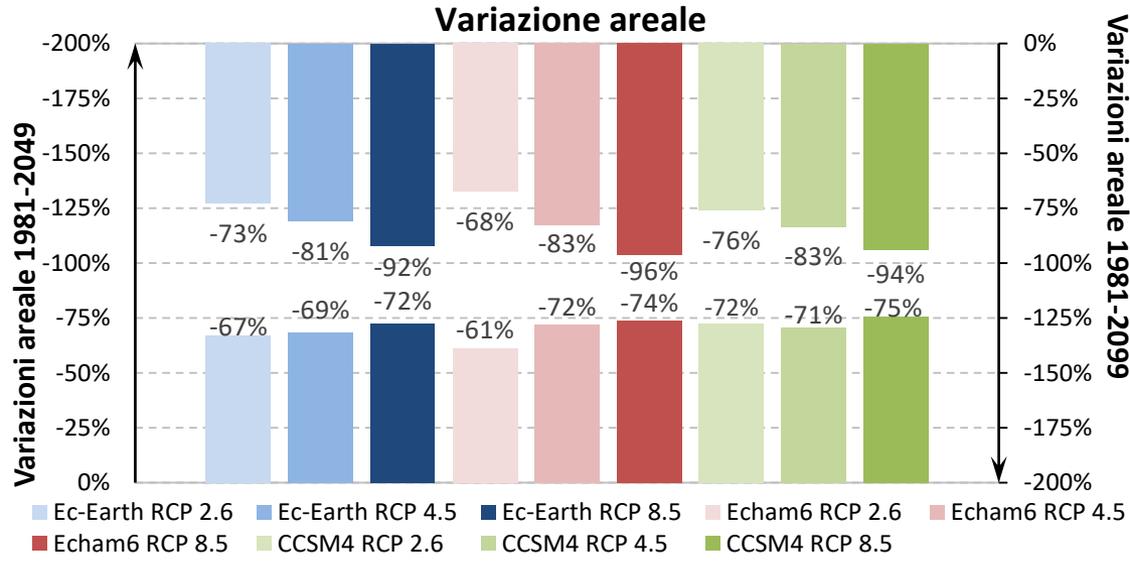
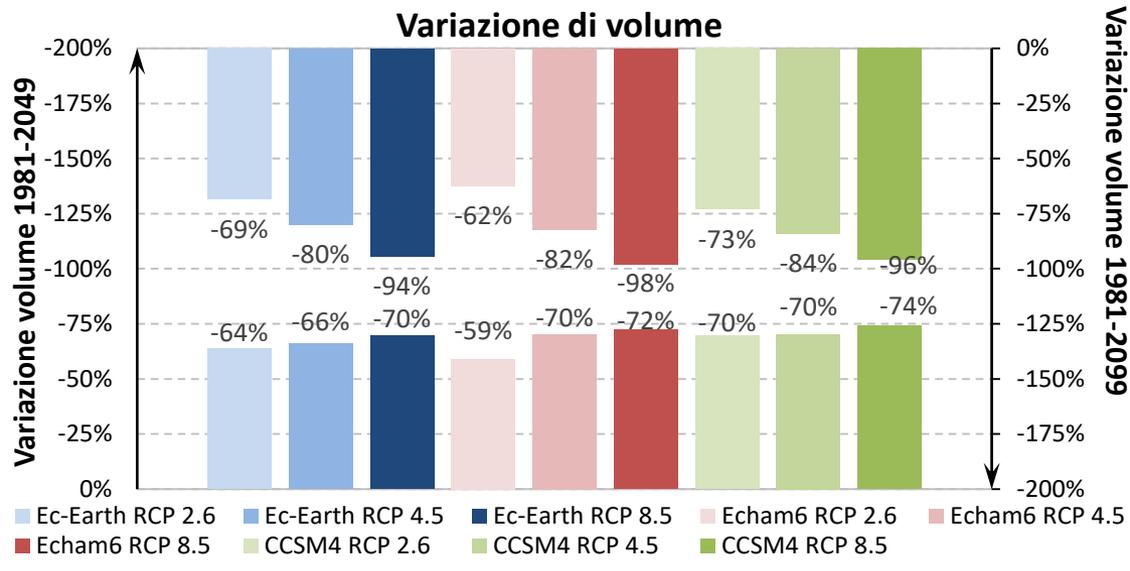


Area: 321 km² (~40% al di sopra dei 2300m s.l.m.);
Area ghiacciai al 2013: 25.6 km² (~8% del totale);
Altitudine: 310-4015 m s.l.m. (Ghiacciai situati tra 2200-3900 m s.l.m.);
Asta fluviale: ~27 km;
Clima: 310-2000 m s.l.m. clima temperato freddo;
 2000-4015 m s.l.m. clima alpino.
Curva ipsografica aree e ghiacciai:



RISULTATI: proiezioni climatiche future

✓ **Sistema glaciale:** variazioni di volume, spessore e area.



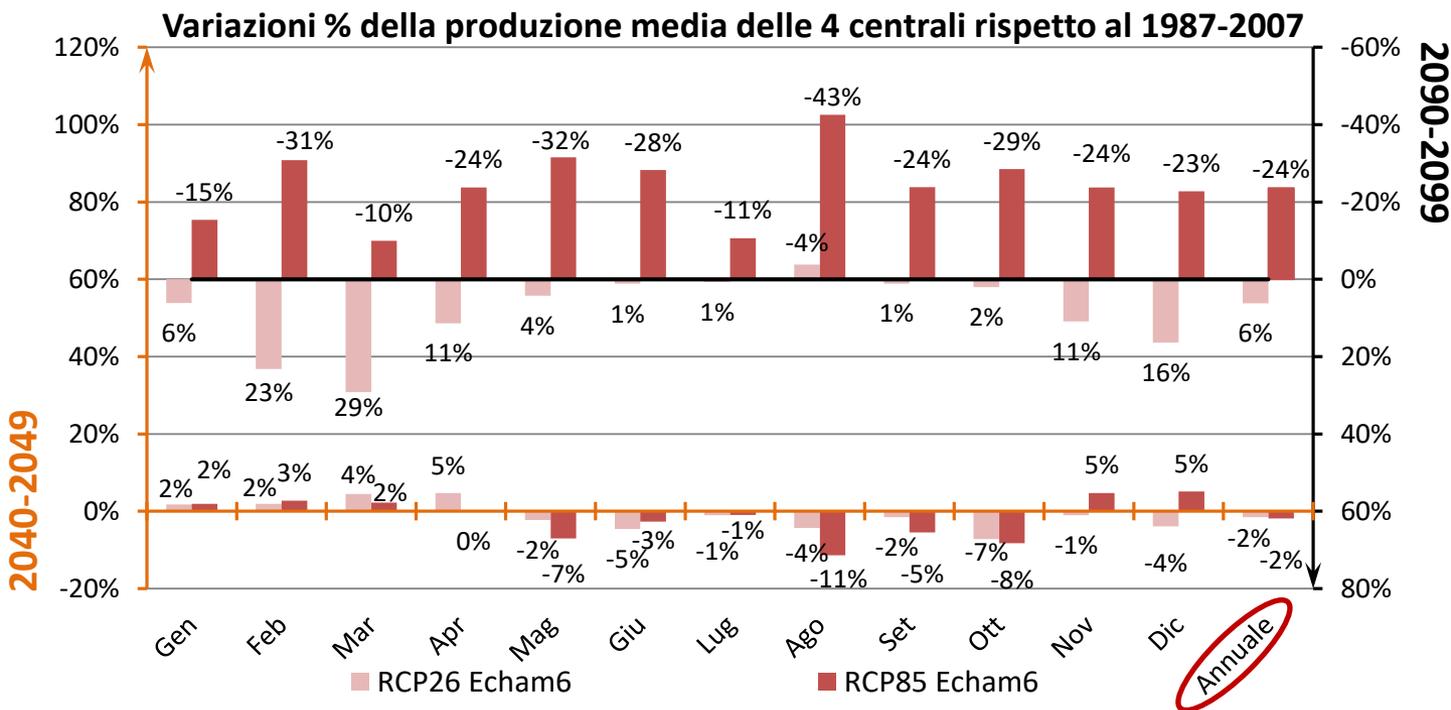
RISULTATI: produzione futura di energia idroelettrica

- ✓ Creazione di uno scenario di riferimento: 1987-2007;
- ✓ Simulazione della gestione del sistema idroelettrico: modello SOdA, fino all'anno 2099;

- ✓ Combinazione più RCP8.5;

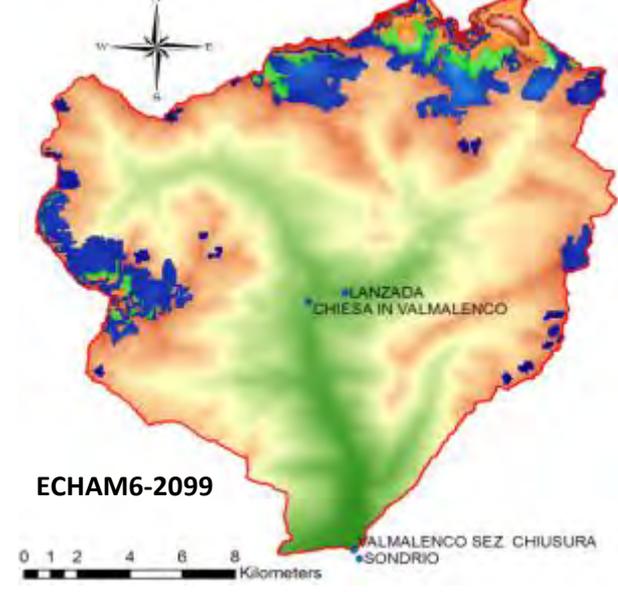
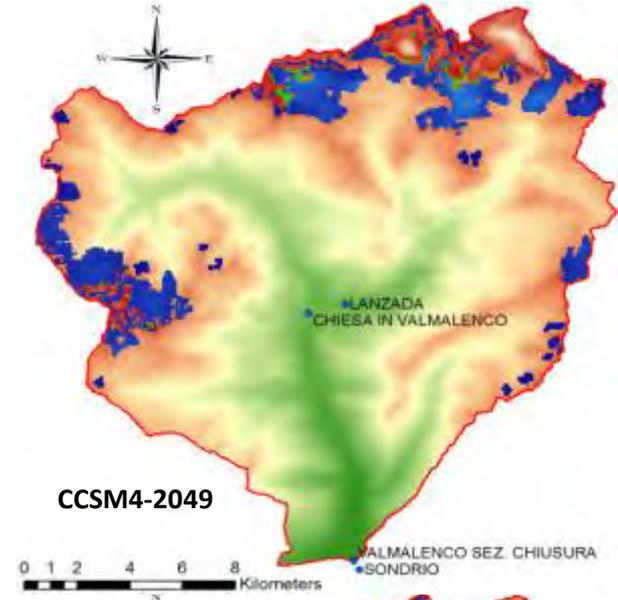
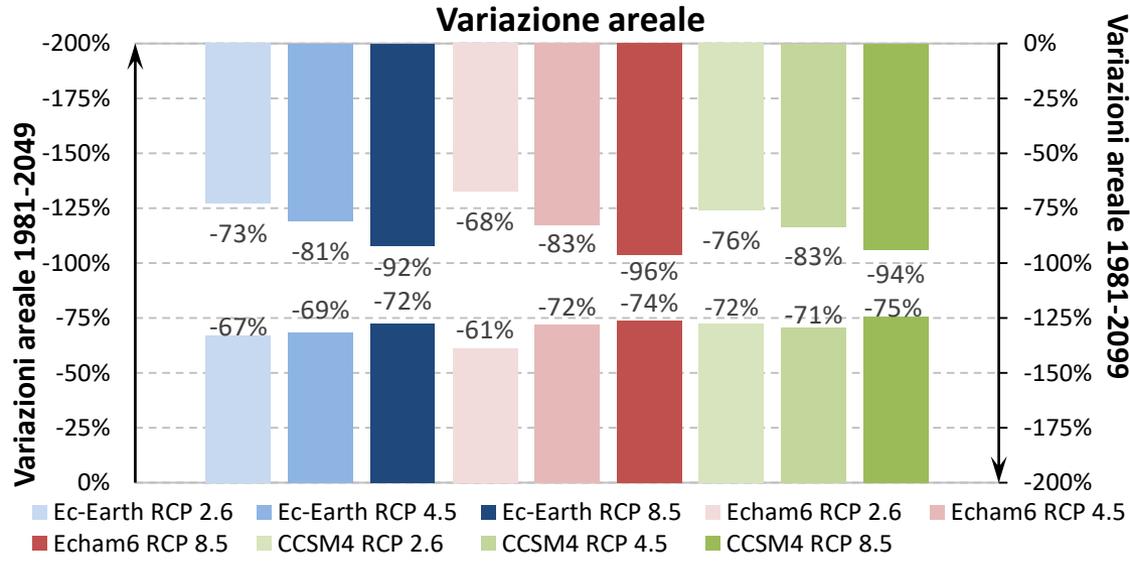
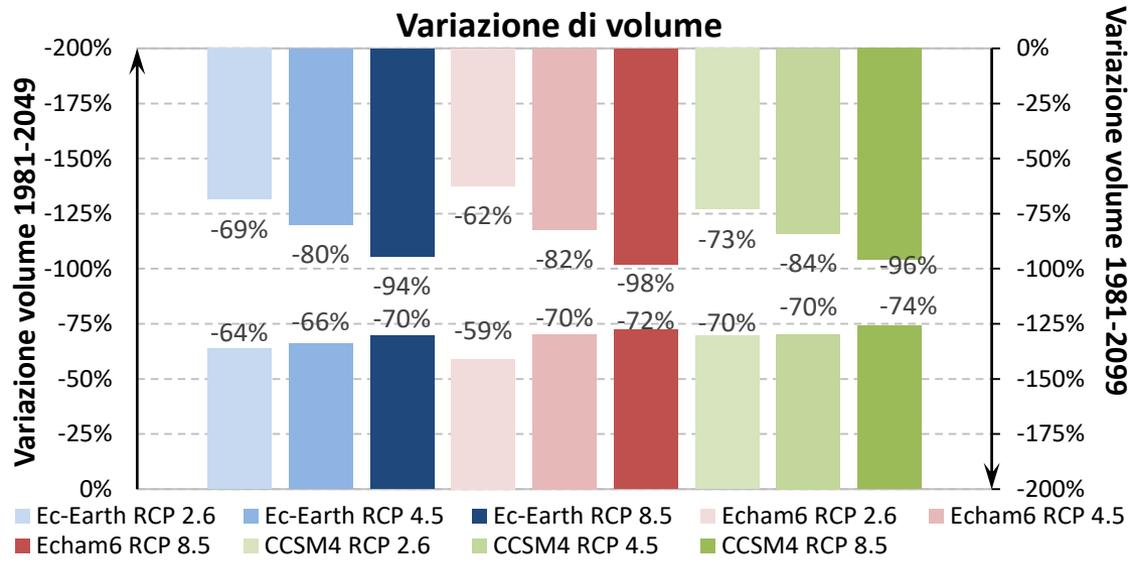
Produzione totale delle quattro centrali 2007-2099 [GWh]								
RCP26			RCP45			RCP85		
EC-Earth	Echam6	CCSM4	EC-Earth	Echam6	CCSM4	EC-Earth	Echam6	CCSM4
73'627	75'856	71'982	74'156	69'524	71'936	74'319	65'693	69'736

Echam6-RCP2.6 e Echam6-



RISULTATI: proiezioni climatiche future

✓ **Sistema glaciale:** variazioni di volume, spessore e area.





GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

Acknowledgments:

A. Tamburini of IMAGEO, and D. Catberro of SMI are kindly acknowledged for sharing information of Sabbione glacier's GPR profiling. Dr. L. Mercalli, and P. Valisa of CGI are kindly acknowledged for sharing ice ablation data. R. Azzoni of University Milano is kindly acknowledged for help in photo interpretation for glacier's area assessment. The present work reports results obtained in fulfilment of the lead author's MS Thesis "La diga del ghiacciaio: cambiamenti climatici e produzione all'impianto del Sabbione". The Thesis was awarded with the "MS Thesis Award of the Italian Glaciological Committee" for the year 2019.