



**Progetto PermaNET**  
*permafrost long term monitoring NETwork*

# La modellazione del permafrost alpino: metodologie, applicazioni e sviluppi



ing. Matteo Dall'Amico, PhD  
Mountain-eering Srl

Prof. Dr. Riccardo Rigon  
Università di Trento

dott. Giorgio Zampedri  
Servizio Geologico, Trento



Provincia Autonoma di Trento  
Dipartimento Protezione Civile e Infrastrutture  
Servizio Geologico



Università di Trento  
Dipartimento di Ingegneria Civile e  
Ambientale



Mountain-eering S.r.l., via  
Siemens 19 BOLZANO



Università di Pavia  
Dipartimento di Scienze della Terra e  
dell'Ambiente



Università di Padova  
Dipartimento di Geografia

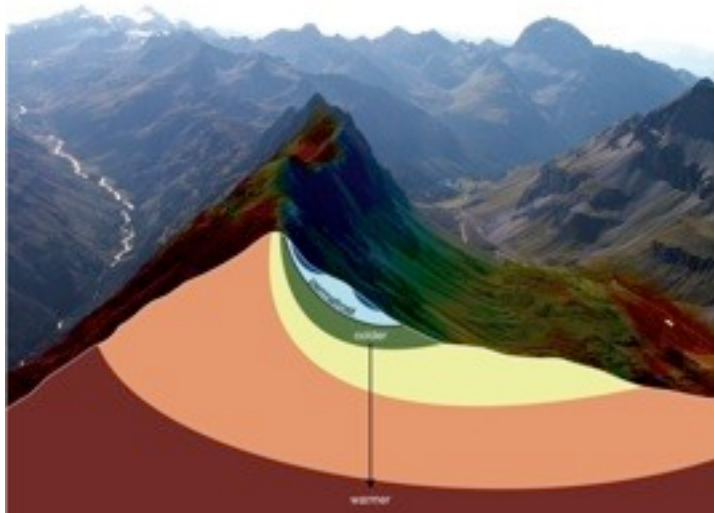
# Modellazione del permafrost Mission “impossible”?





# Caratteristiche del permafrost

## Topografia



courtesy of Stephan Gruber  
(University of Zurich)

Variazioni topografiche ed eterogeneità copertura suolo



flessibilità e spazializzazione dati ingresso

## Neve



grandi proprietà isolanti



Interazioni termiche suolo - neve

## Ghiaccio / acqua nel terreno



calore latente



cambiamento di fase e avvezione nell'equazione del calore

## Grande inerzia termica



lunghi tempi di risposta (10000 anni!!)



condizioni iniziali adeguate

# Modellazione del permafrost

Due principali approcci modellistici:

- modelli “localizzatrici”
- modelli “evolutivi”



	<b>localizzazione</b>	<b>evoluzione</b>
Scala	grossolana (1 a 100 km)	dettaglio (1 a 10 m)
Obiettivo	pianificazione	analisi locali
metodo	statistico	fisico-matematico
Validazione	prove indirette (geomorfologiche) o dirette (misure) indicanti la presenza	serie temporali di temperatura

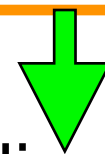


# LA MODELLAZIONE DEL PERMAFROST IN TRENTINO

# Modello del permafrost di PermaNET

## MODELLO STATISTICO “LOCALIZZATORE”

	<b>detrito superficiale</b>	<b>roccioso ripido</b>
		
regressori	MAAT, PISR, PRECIP	MAAT, PISR
mod. statistico	generalized linear mixed model	linear regression
var. esplicative	Rock glacier relitti Vs intatti	$P(MARS < 0)$
Thermal offset	variabilità cond. termica roccia, presenza discontinua di neve, fratturazioni... provocano la presenza di sfasamenti (offset) termici (Gruber and Haeberli, 2007; Hasler et al., 2011).	

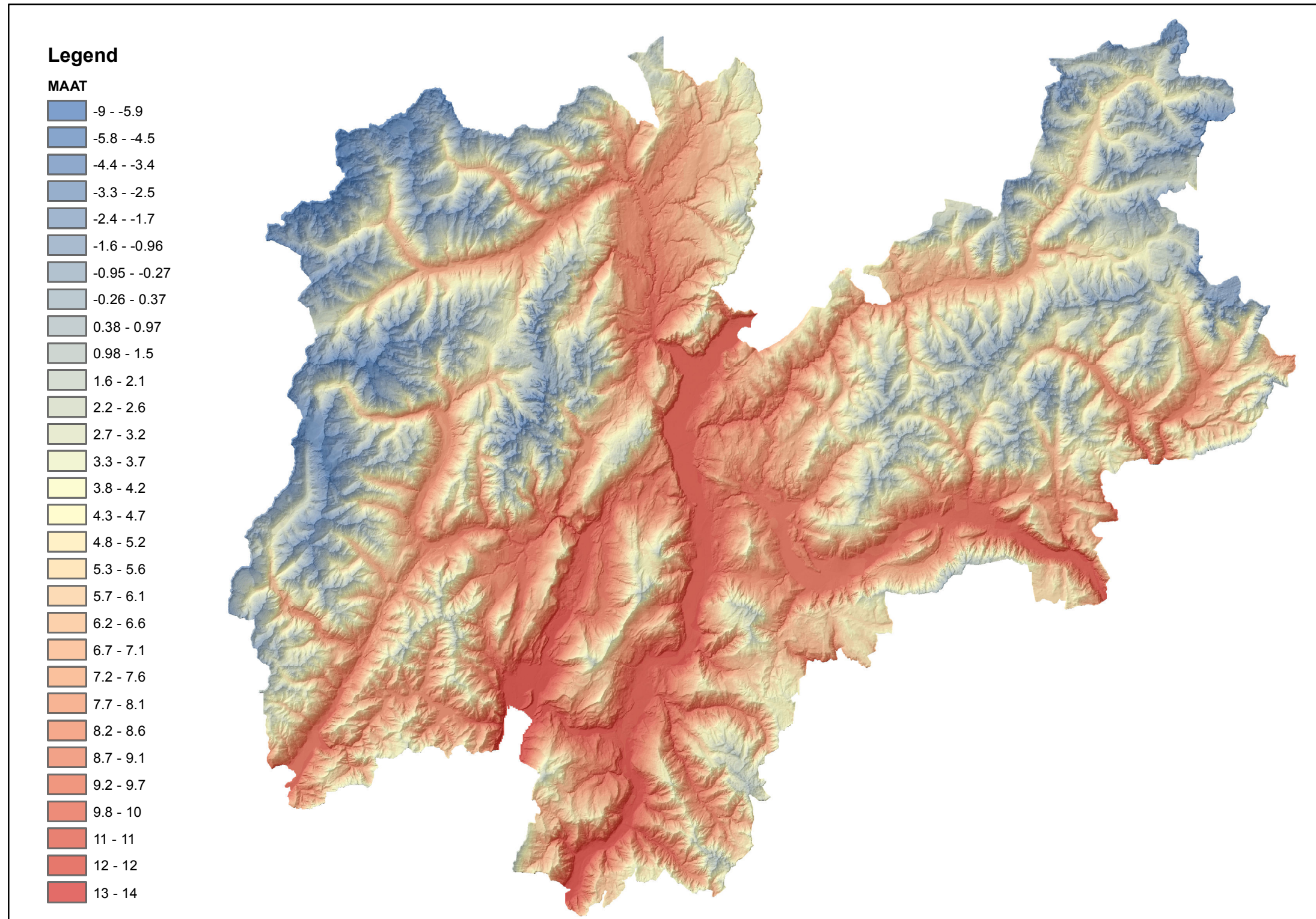


**INDICE di presenza di permafrost, non probabilità**



# MAAT (Mean annual air temperature)

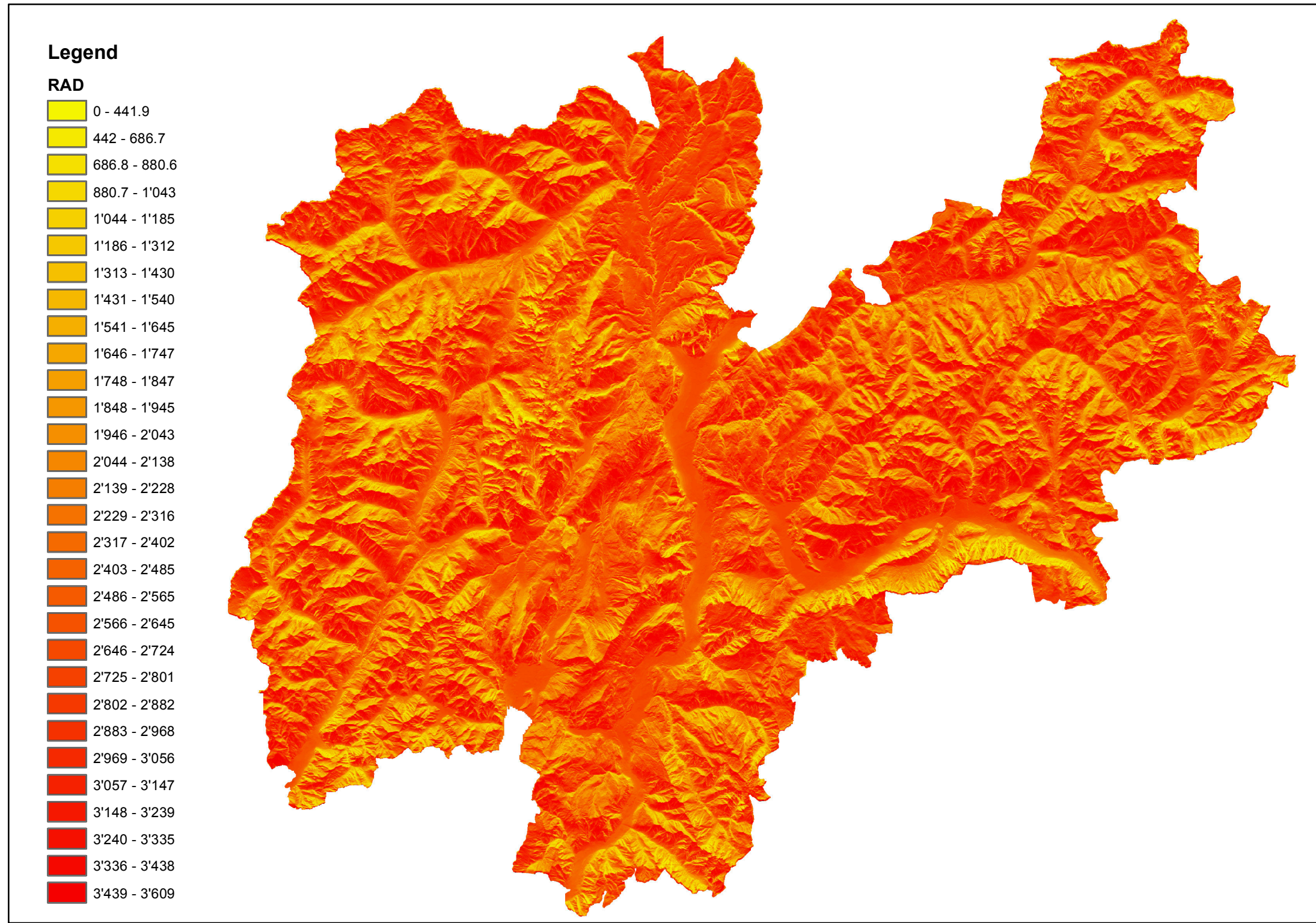
temperatura media annuale (°C)





# PISR (Potential incoming solar radiation)

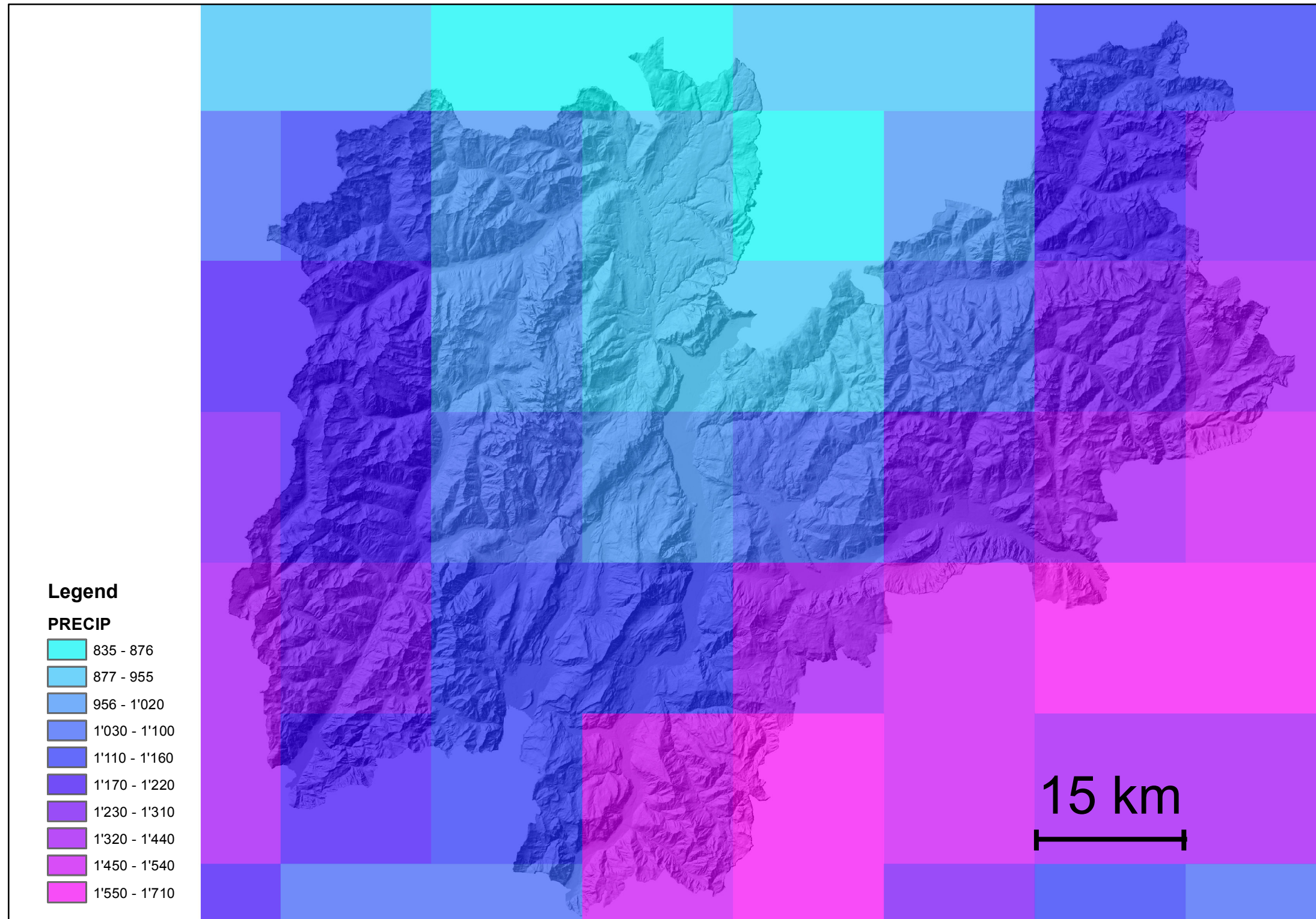
## Radiazione potenziale entrante





# Precipitazione

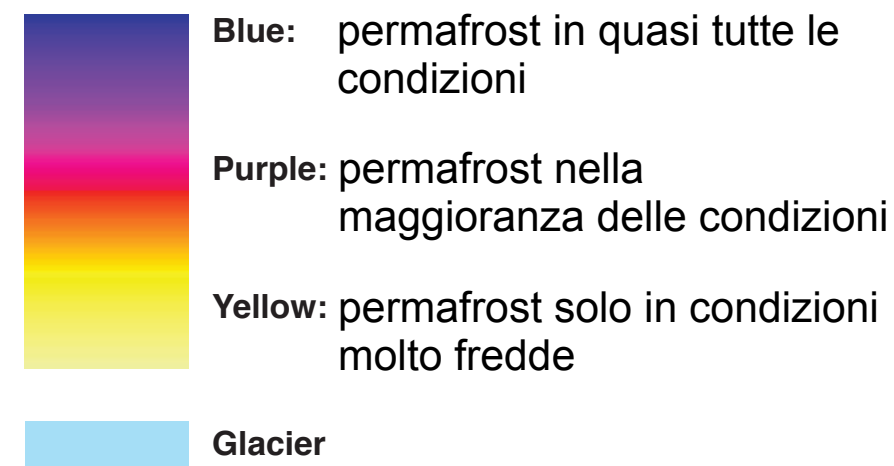
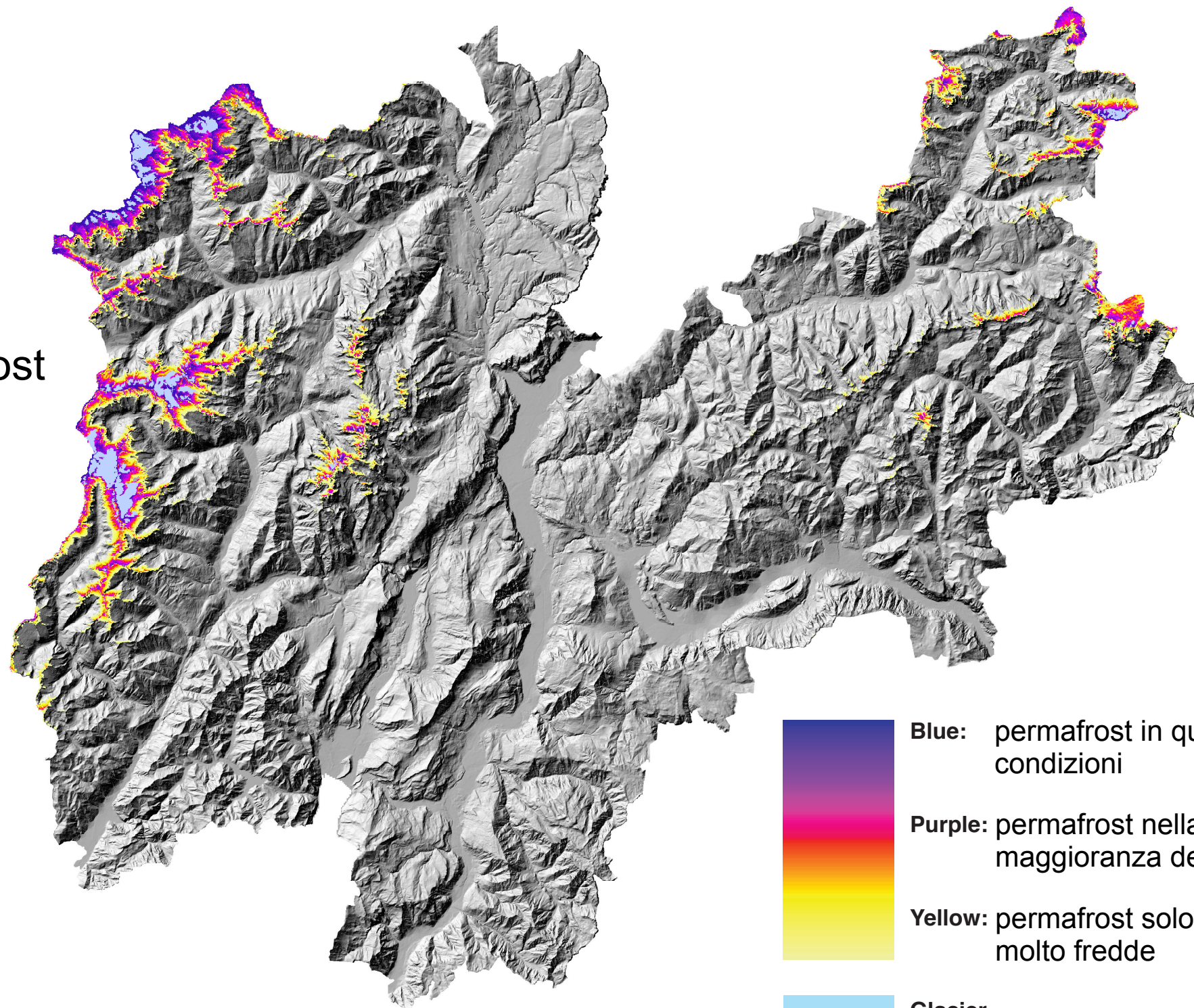
Precipitazione media annuale (mm a<sup>-1</sup>)





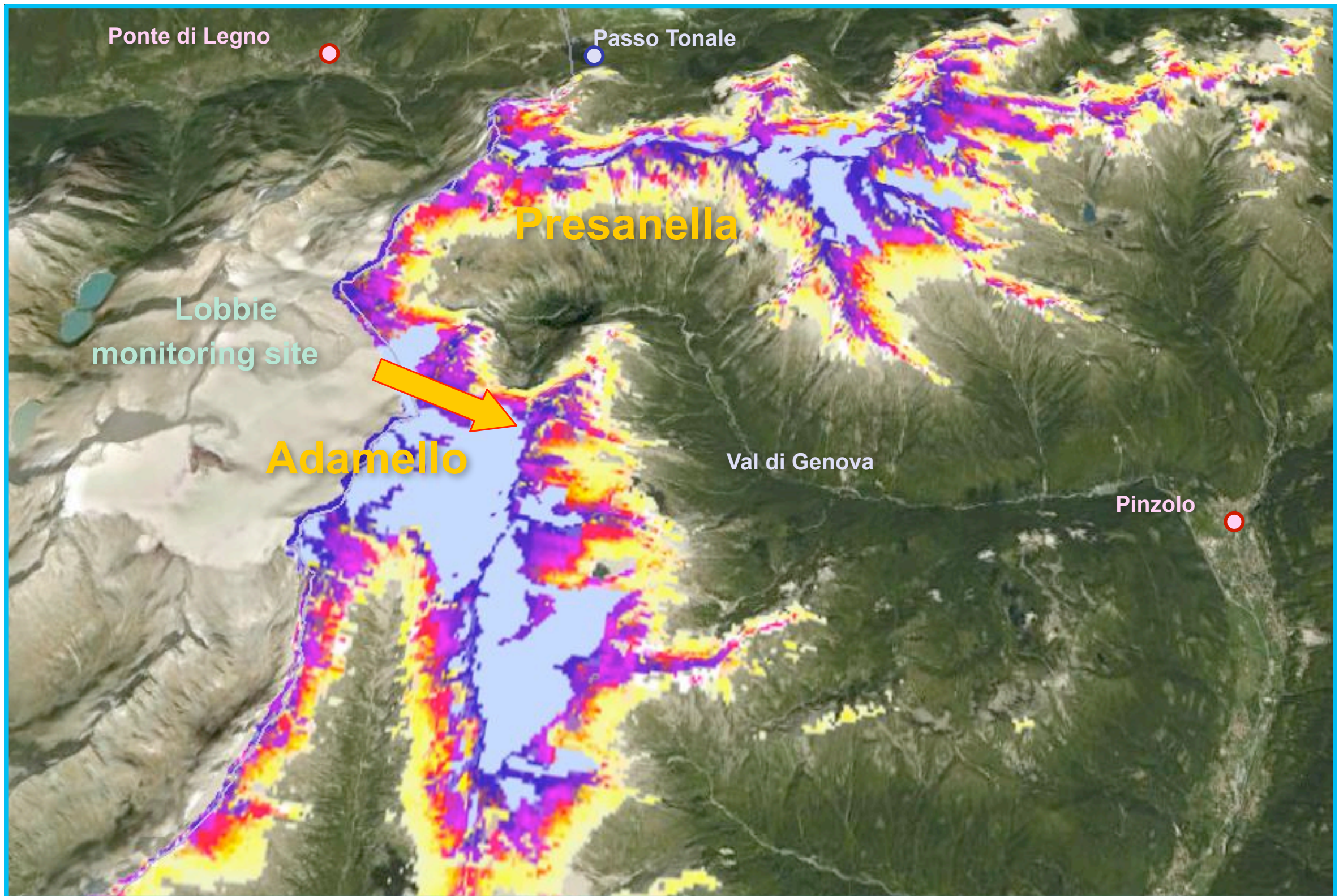
# Mappa del permafrost in trentino

NON probabilità ma  
INDICE del permafrost



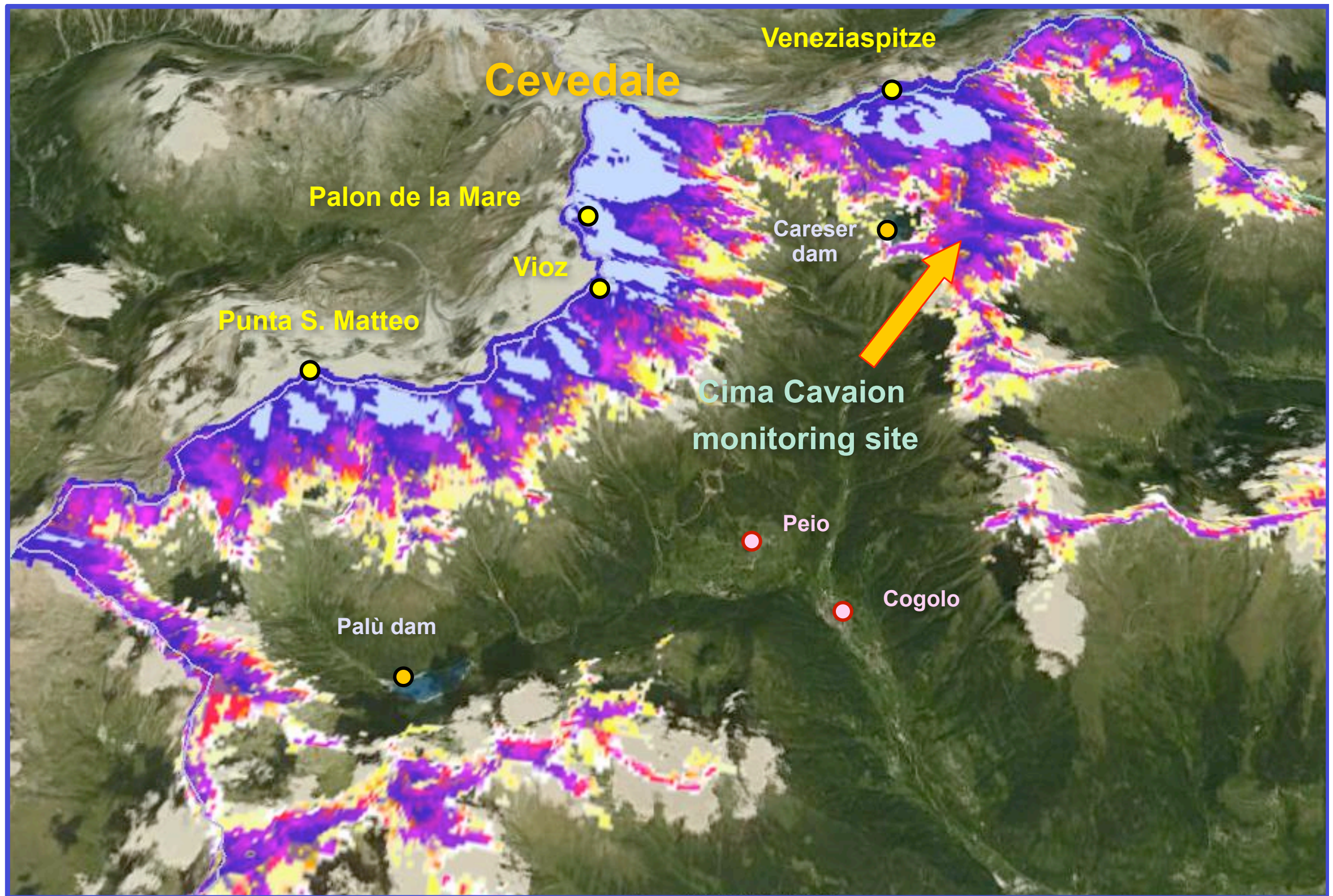


# Adamello-Presanella



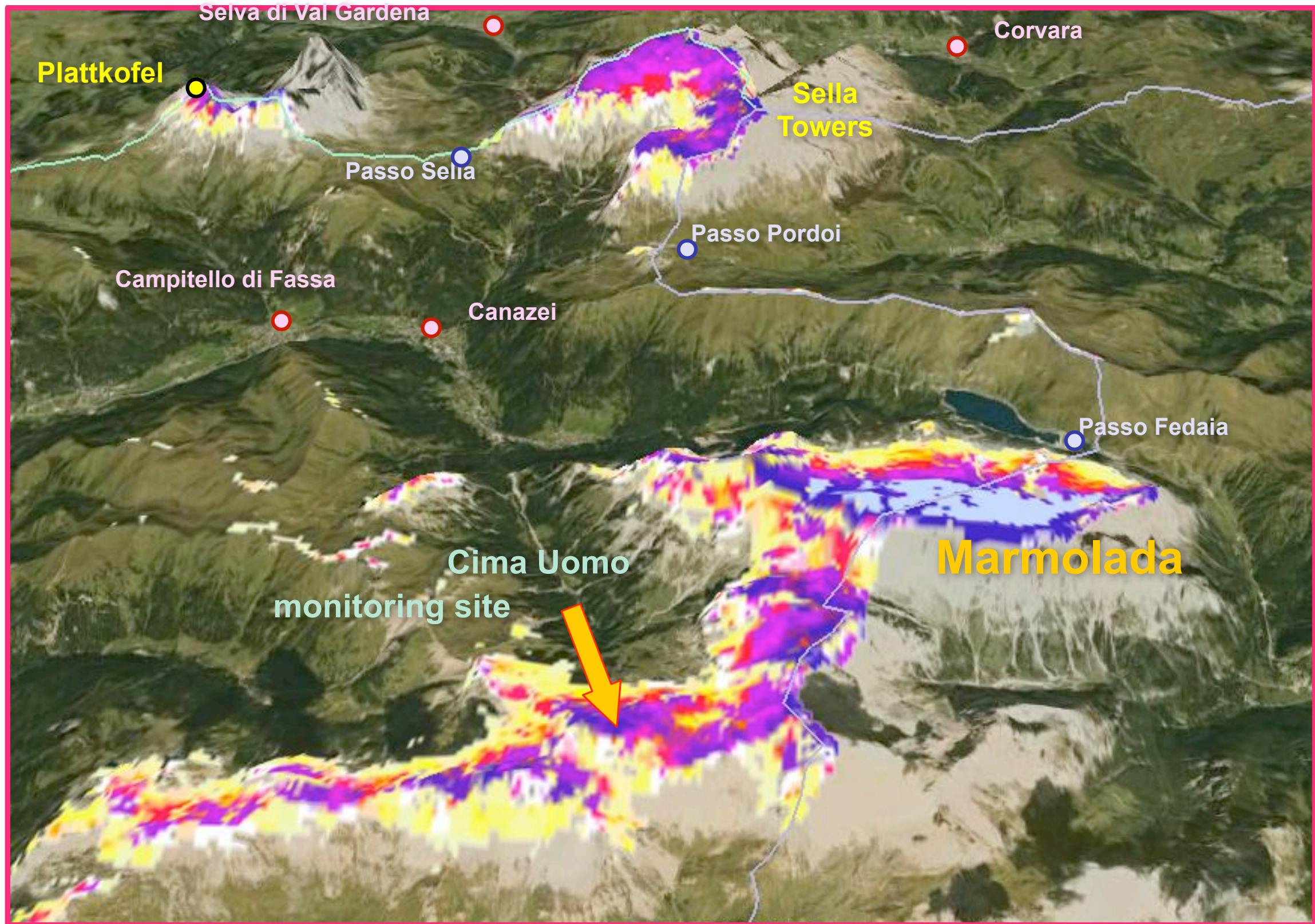


# Ortles-Cevedale





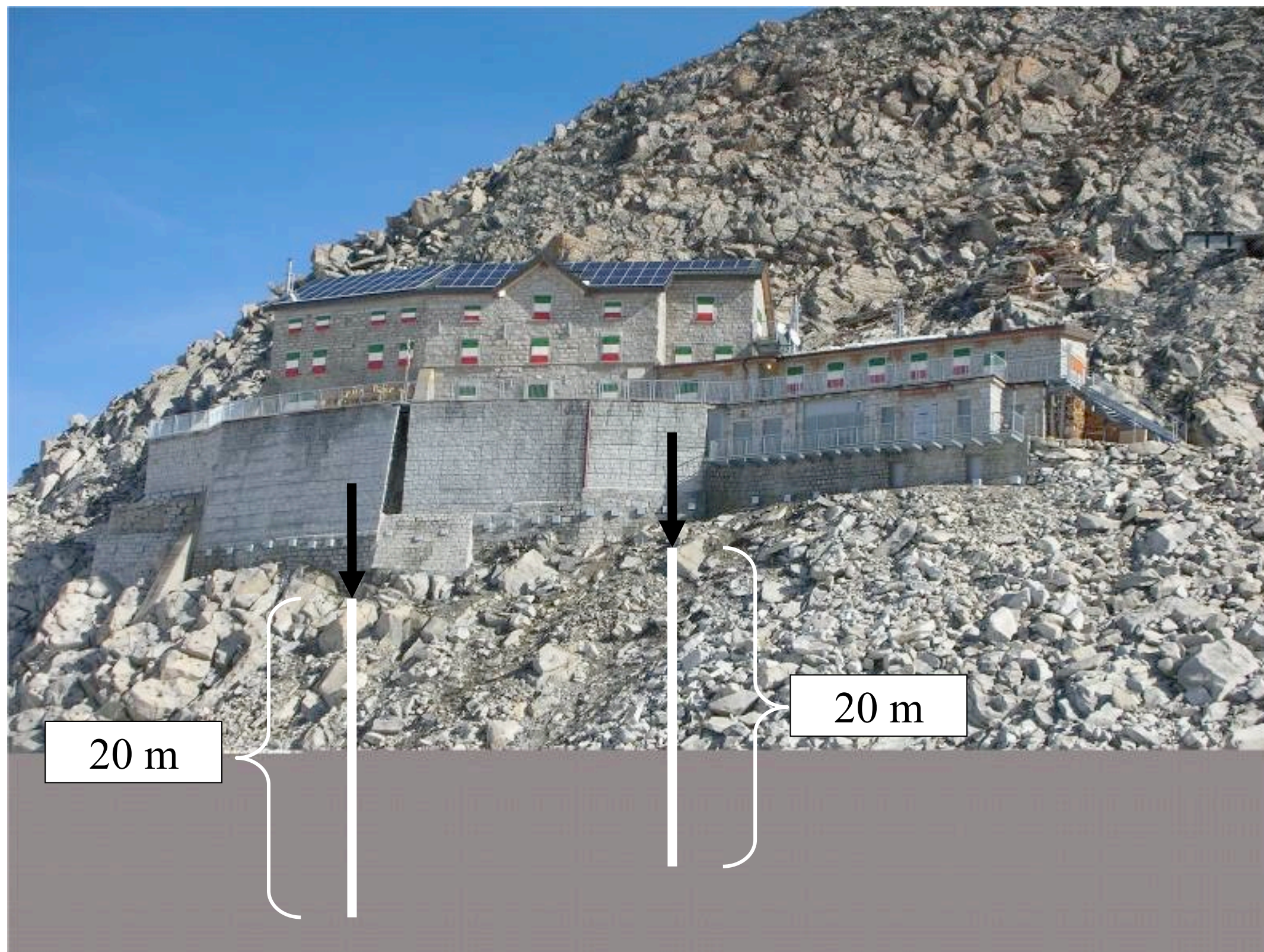
# Dolomiti





# LA MODELLAZIONE DI DETTAGLIO DEL PERMAFROST

## Rifugio “Ai Caduti dell’Adamello”





# Sito "Ai Caduti dell'Adamello"

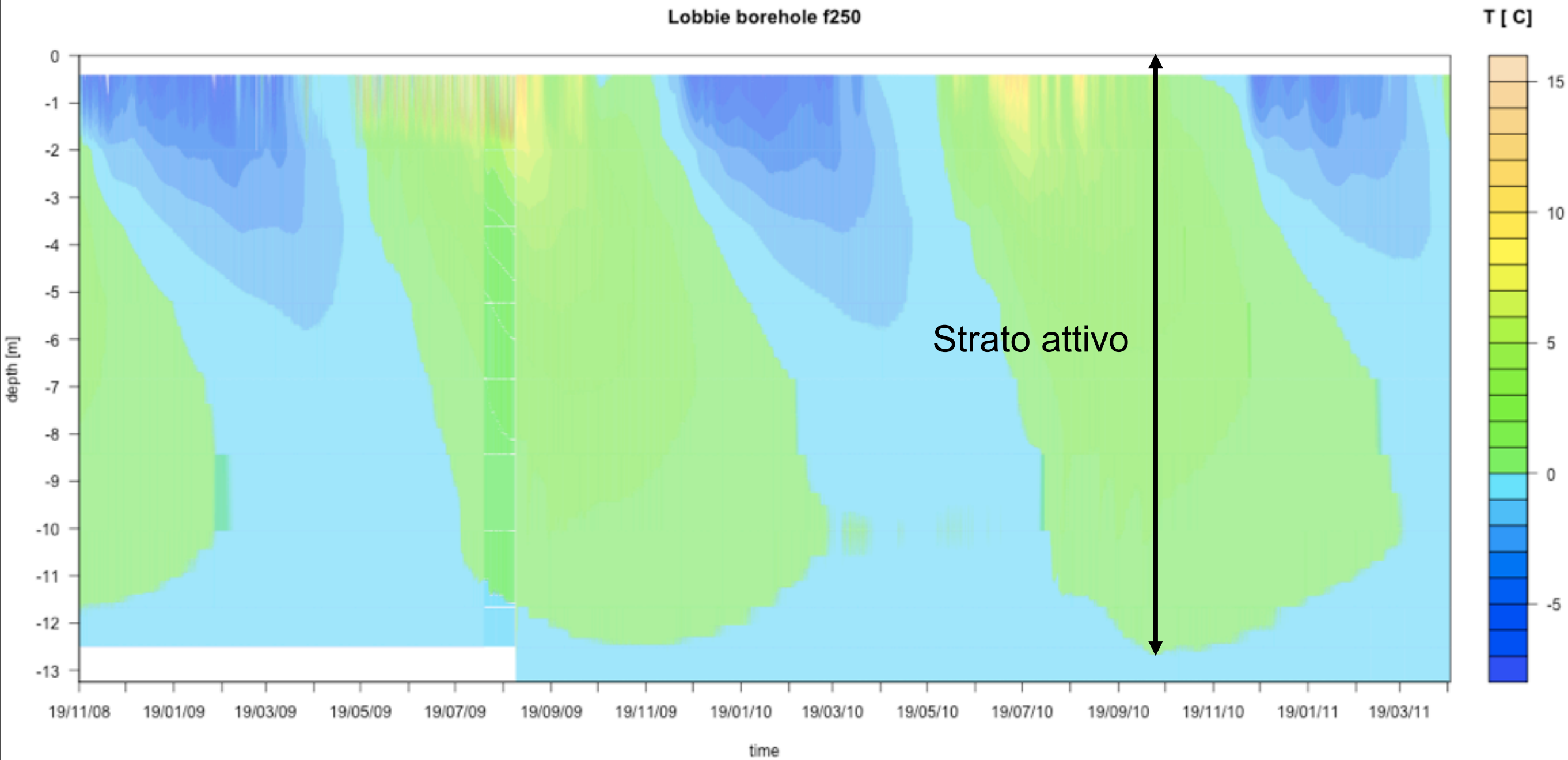




# Calibrazione modello di evoluzione



# permafrost "relitto"





# Installazione radiometro e anemometro





# GEOtop: modellazione EVOLUZIONE permafrost

ciclo dell'acqua

*Rigon et al. (2006)*  
*Bertoldi et al. (2007)*



analisi termiche  
*Dall'Amico (2010),*  
*Dall'Amico et al. (2011 b)*



neve, ghiacciai,  
permafrost

*Zanotti et al. (2004)*  
*Endrizzi (2007)*  
*Dall'Amico et al (2011 a)*

evapo-  
traspirazione

*Bertoldi et al. (2010)*  
*Endrizzi et al. (2010)*

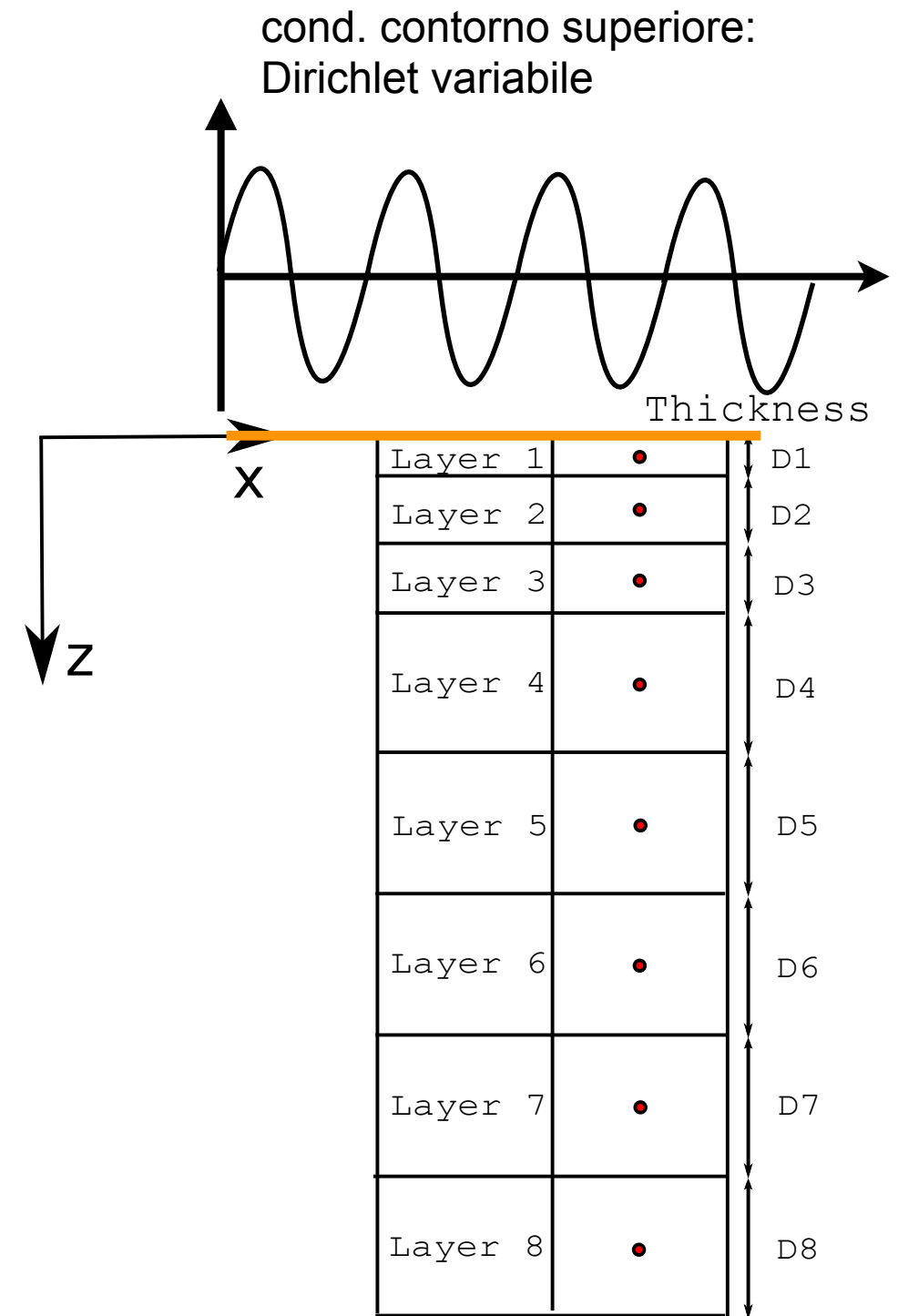
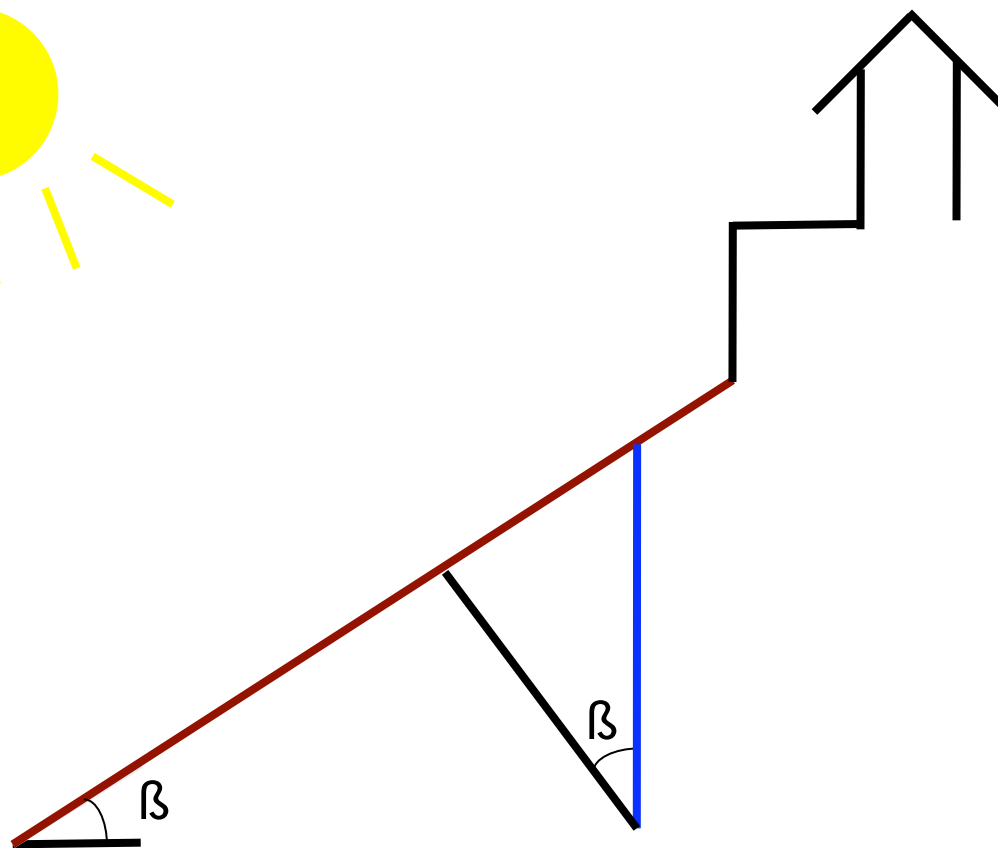
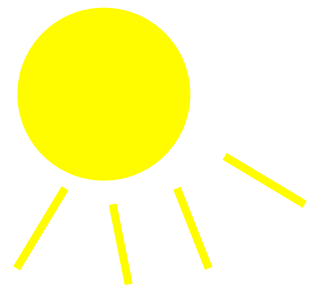


dissesti  
idrogeologici  
*Simoni et al. (2007)*

**GEOtop**  
www.geotop.org



# Calibrazione modello di evoluzione

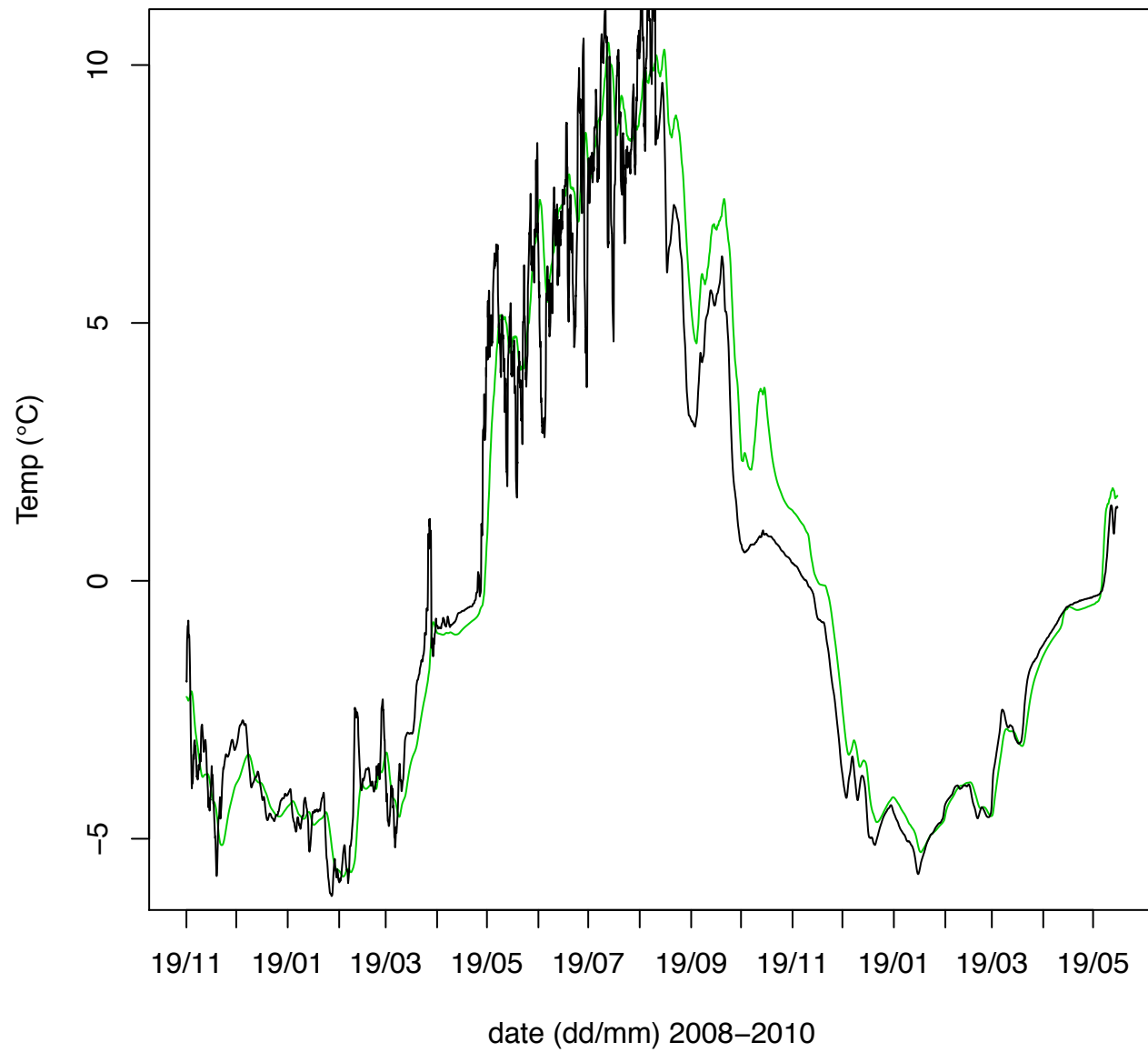


$Z_{AA}=13 \text{ m}$

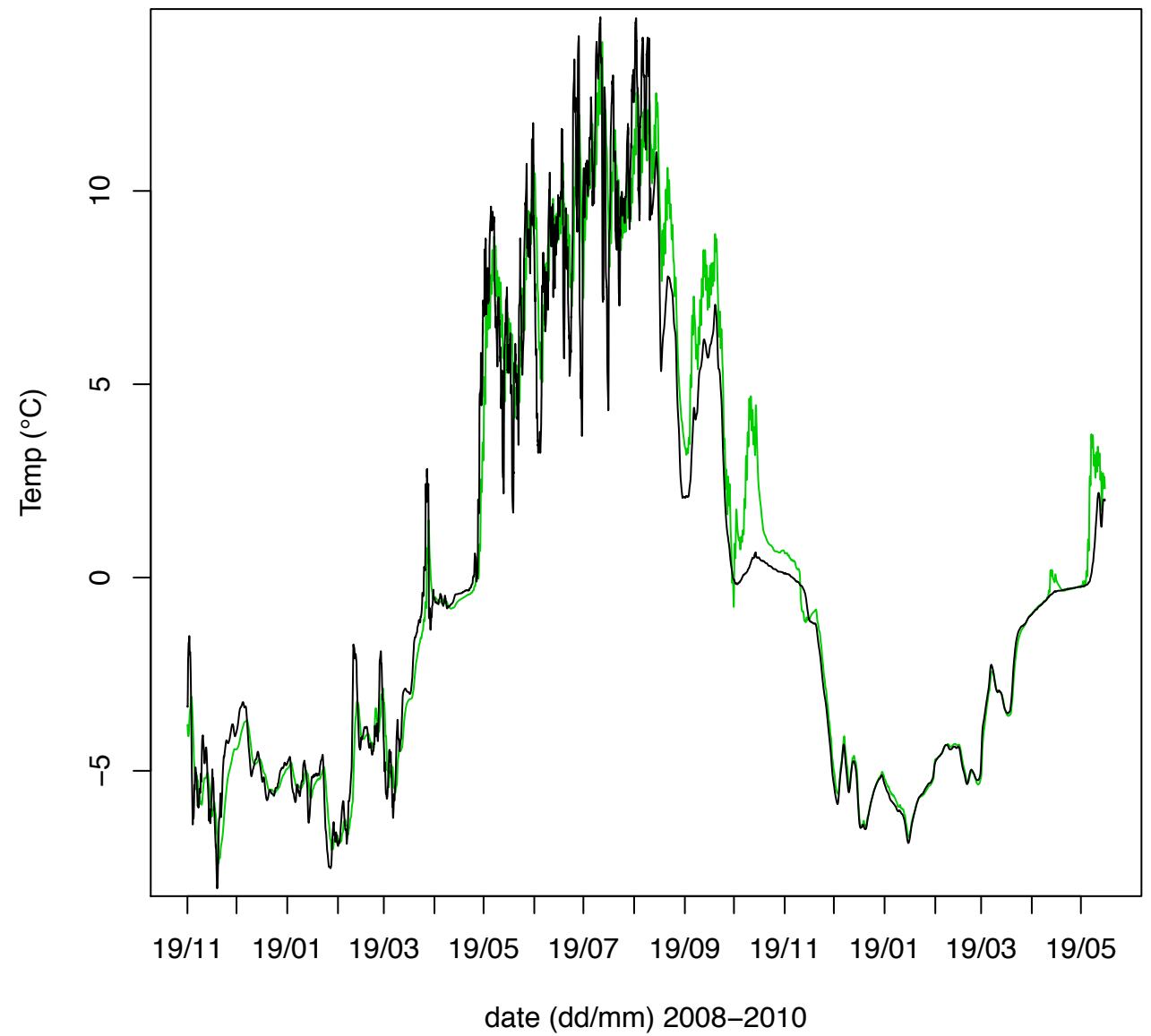
$T(Z_{AA})=-0.25^\circ\text{C}$

cond. contorno inferiore:  
Dirichlet fisso

Profilo di T°C ad una profondità di 1 metro

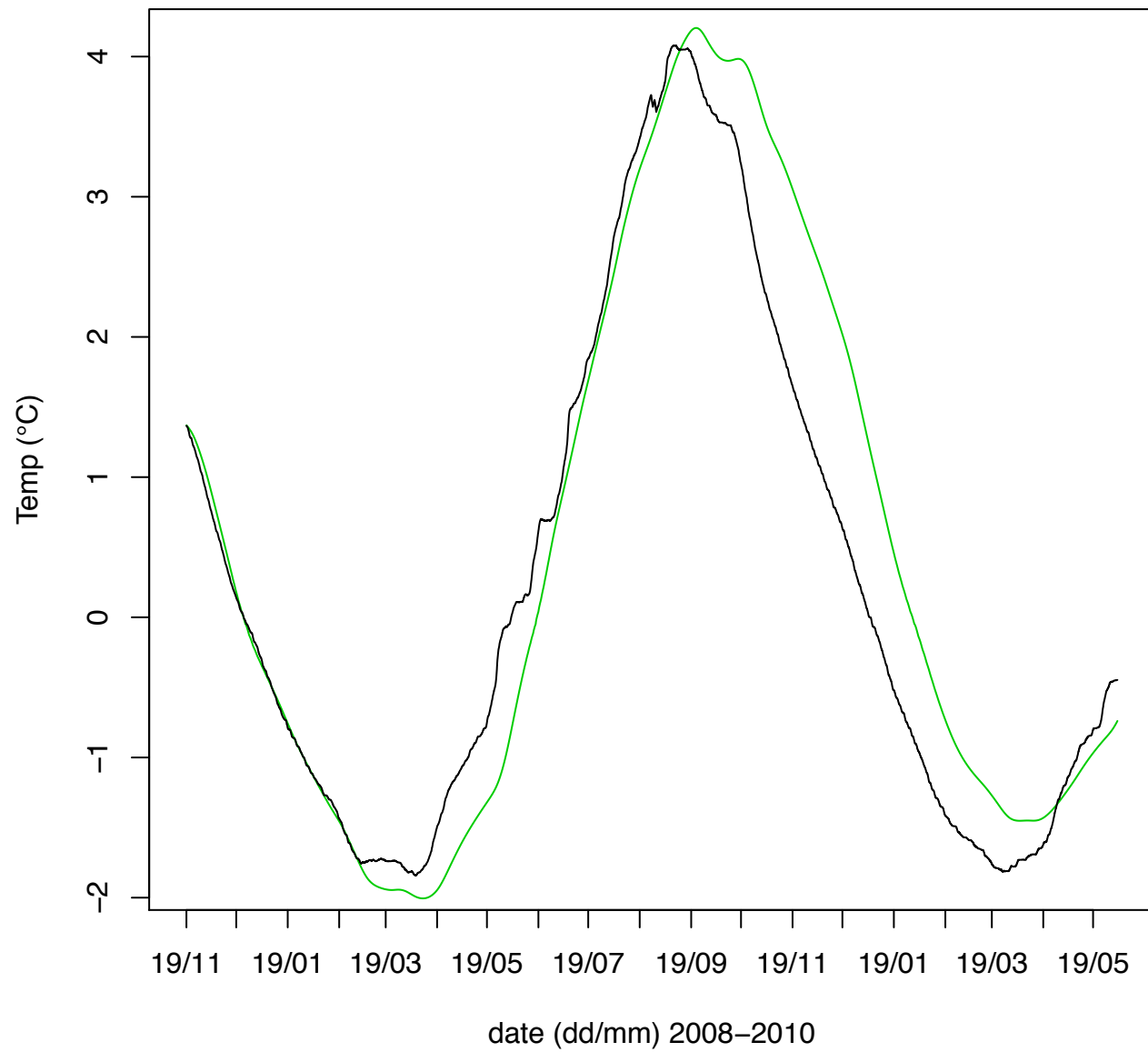


Profilo di T°C ad una profondità di 50 cm

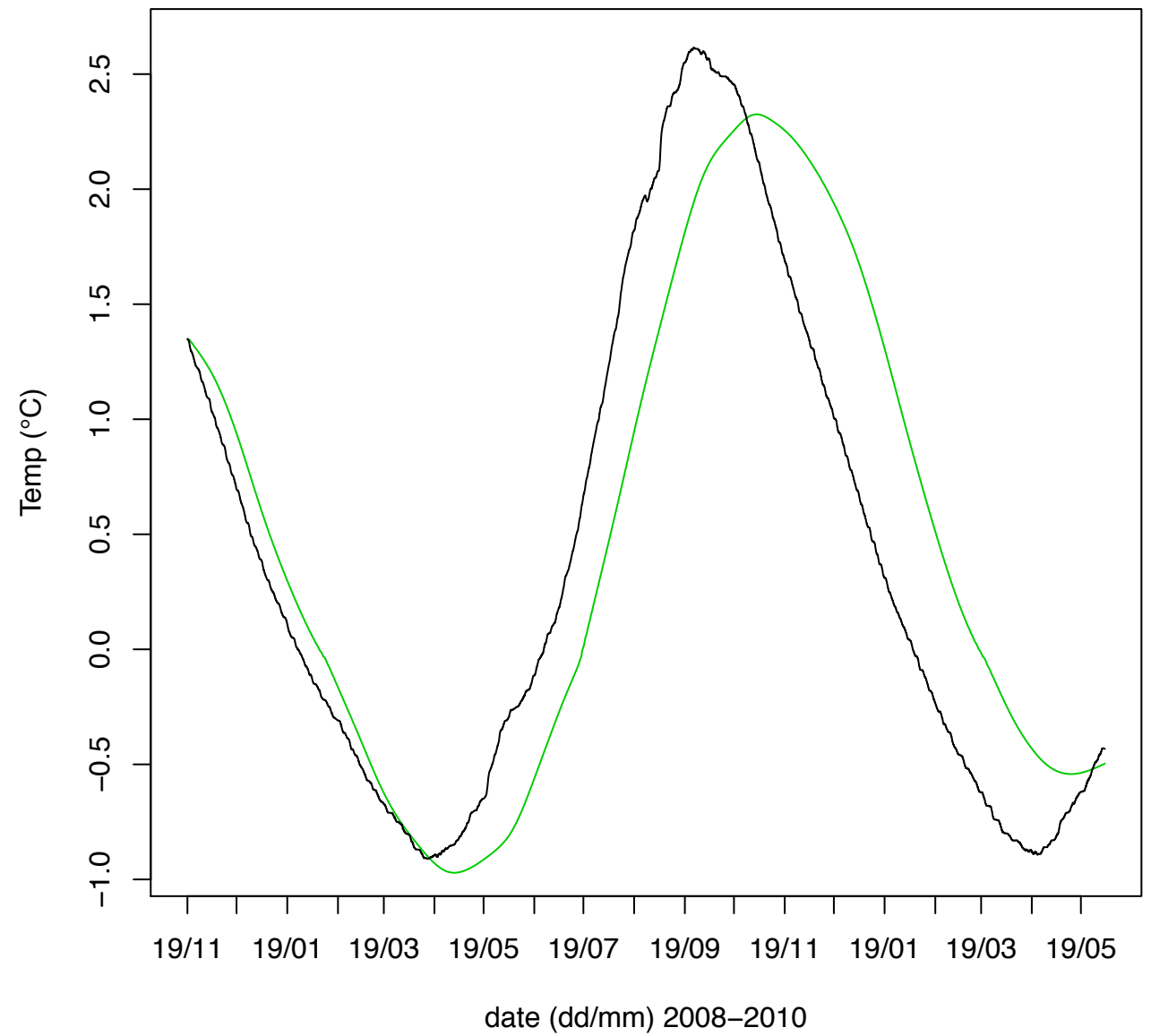




Profilo di T°C ad una profondità di 4 metri

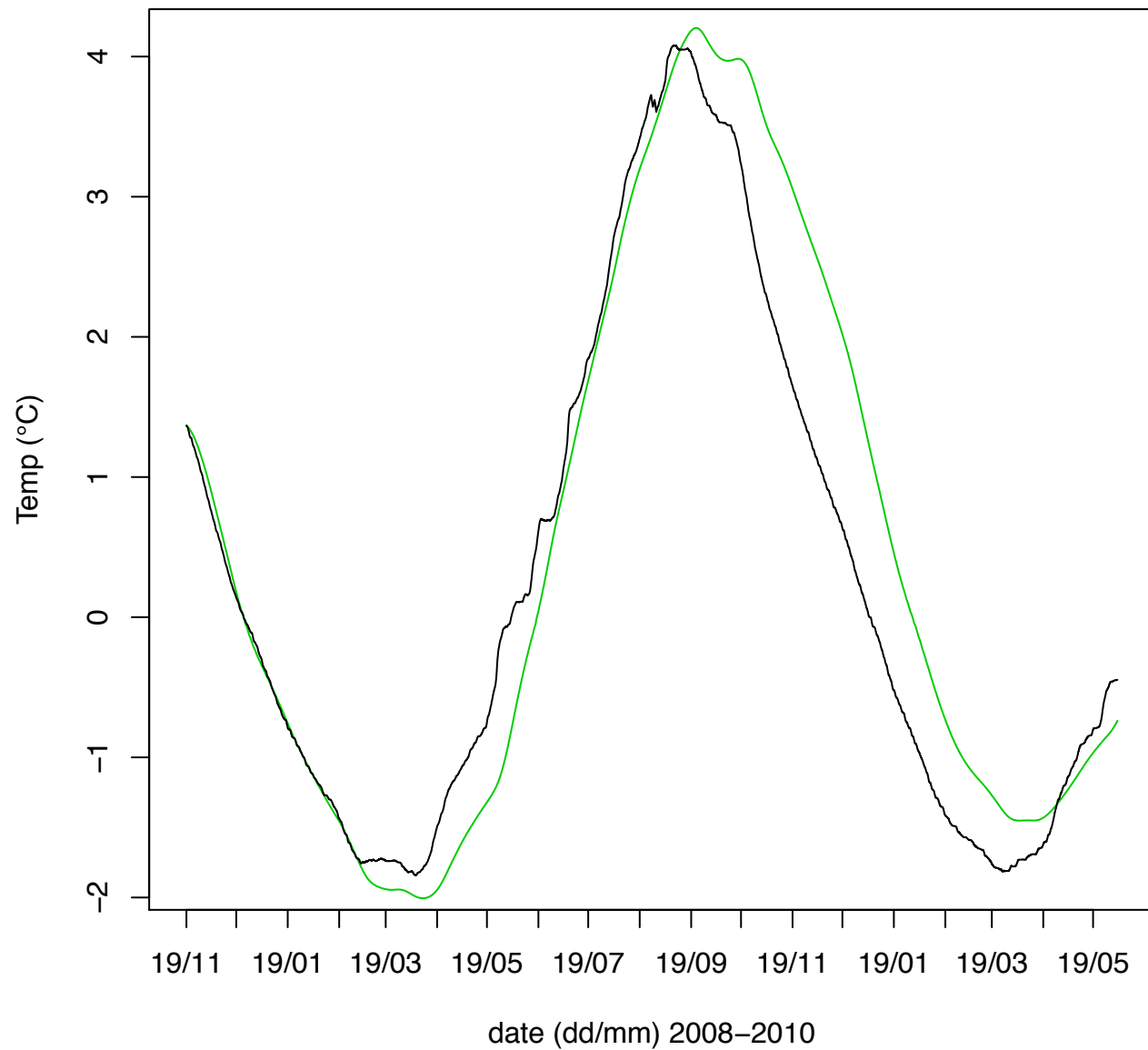


Profilo di T°C ad una profondità di 6 metri

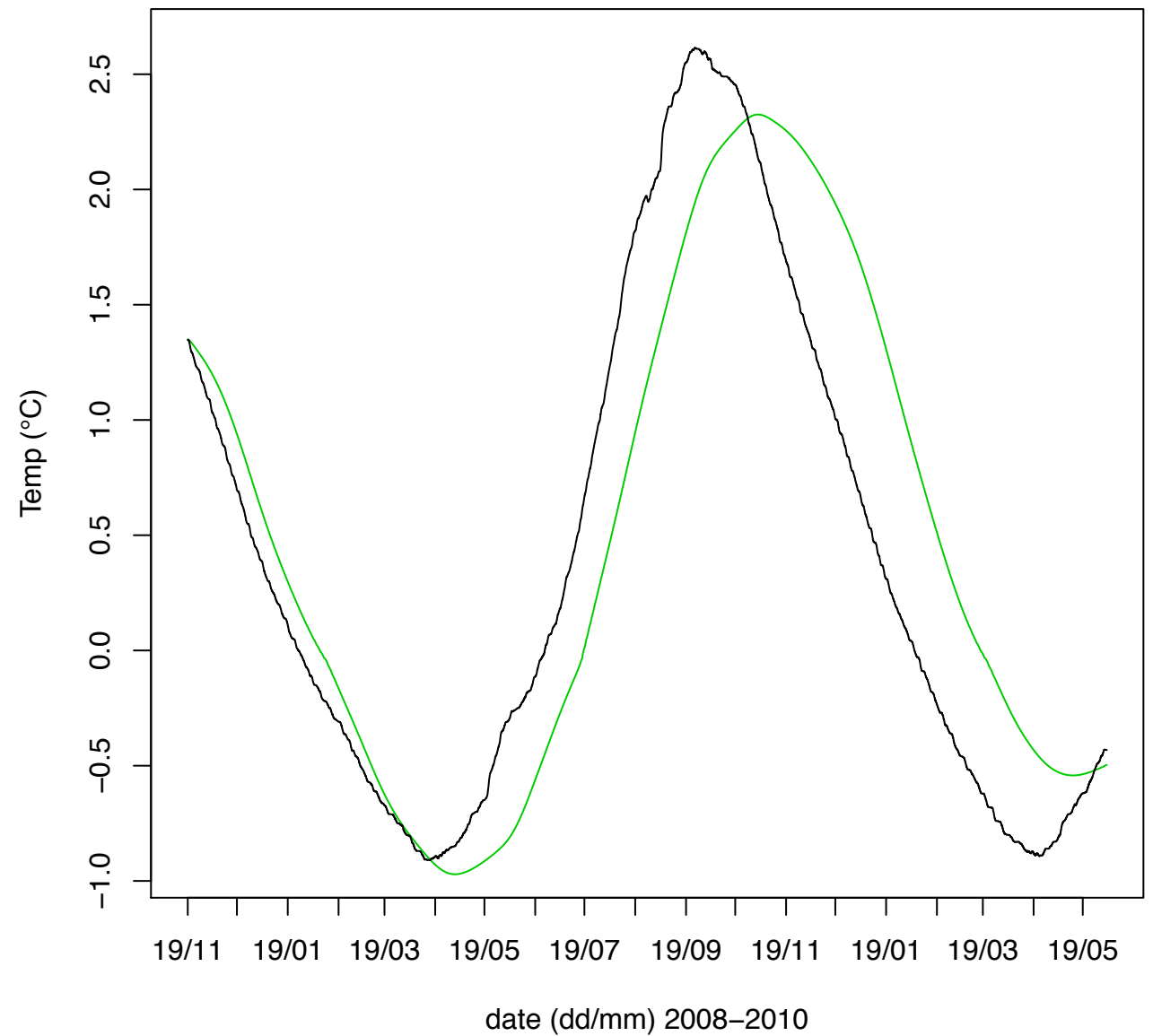




Profilo di T°C ad una profondità di 4 metri



Profilo di T°C ad una profondità di 6 metri



**TALE ANALISI PERMETTE DI  
INFERIRE PROPRIETA' LOCALI**



cond. termica:  $2.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$   
cap. termica:  $2.0 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$   
porosità: 0.05



# EVOLUZIONE DEL PERMAFROST: permafrost e piccola età glaciale





Grande inerzia termica

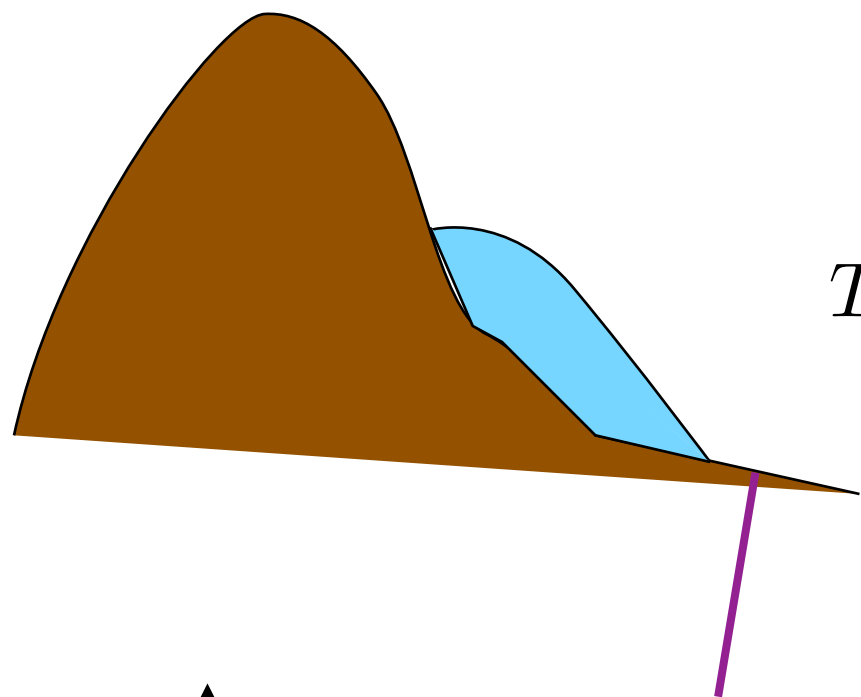
lunghi tempi di risposta  
(10000 anni!!)



condizioni iniziali  
adeguate



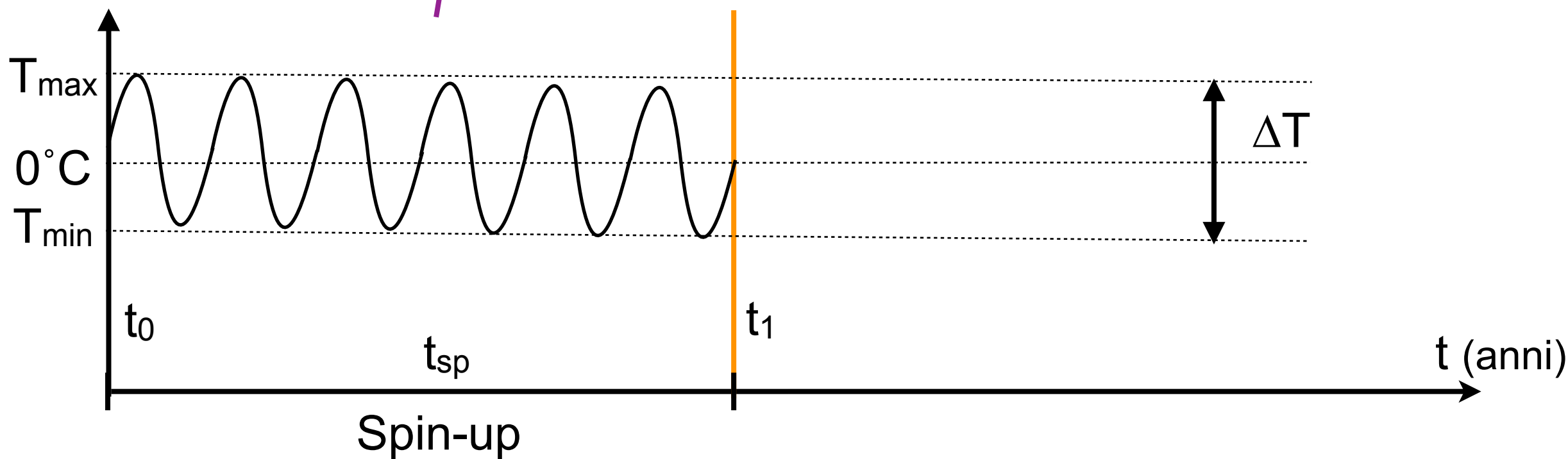
# Inizializzazione (Spin-up)



## Forzante di Spin-up

$$T_{sup}(0, t) = T_a(t) = \text{MAAT} + \frac{(T_{\max} - T_{\min})/2}{\Delta T(z)} \cdot \sin \frac{2\pi(t - s_t)}{\tau}$$

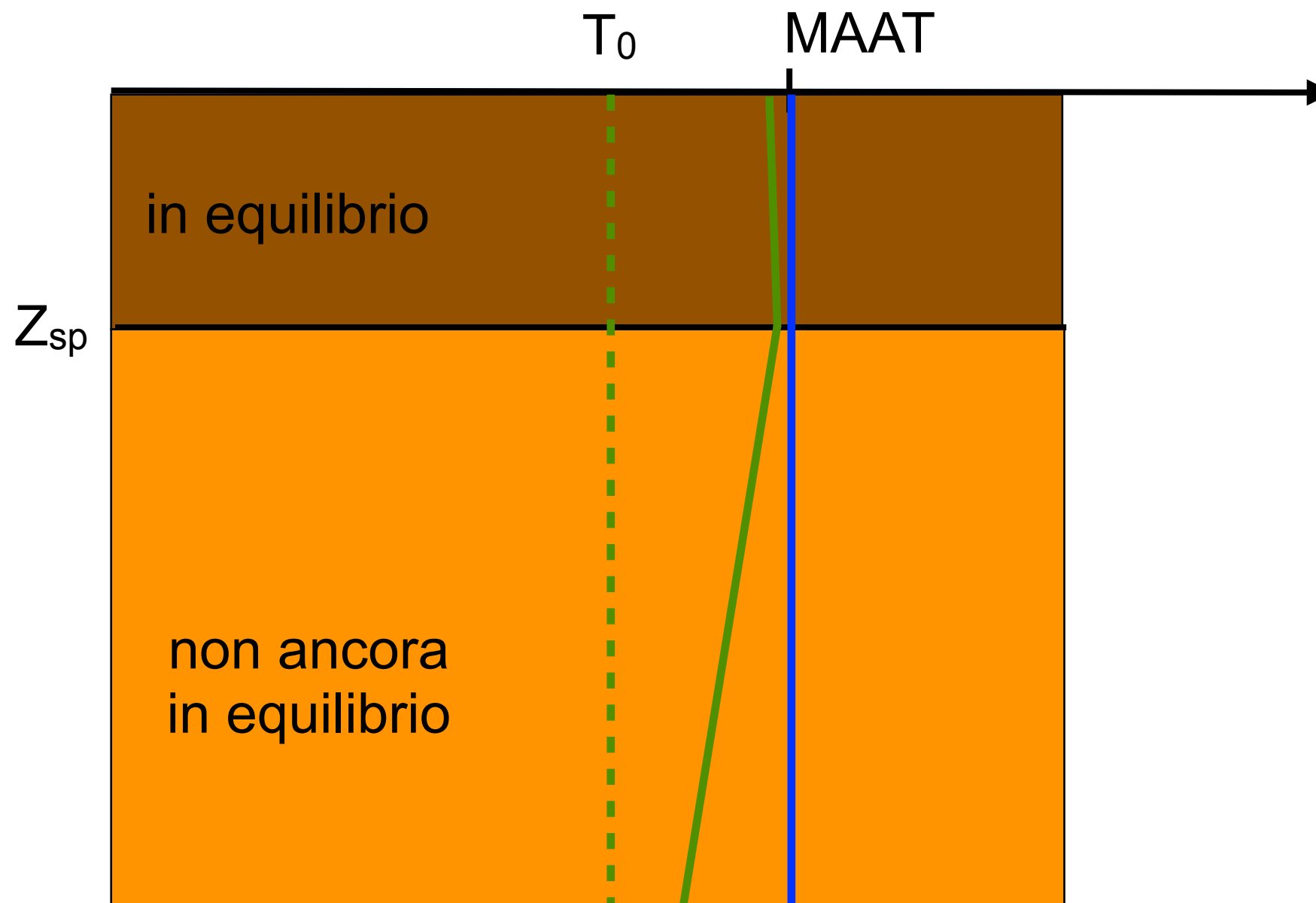
$(T_{\max} - T_{\min})/2$  (amplitude)  
 $\Delta T(z)$  (amplitude)  
 $s_t$  (sfasamento (gg))  
 $\tau$  (periodo (365 gg))



# Inizializzazione (Spin-up)

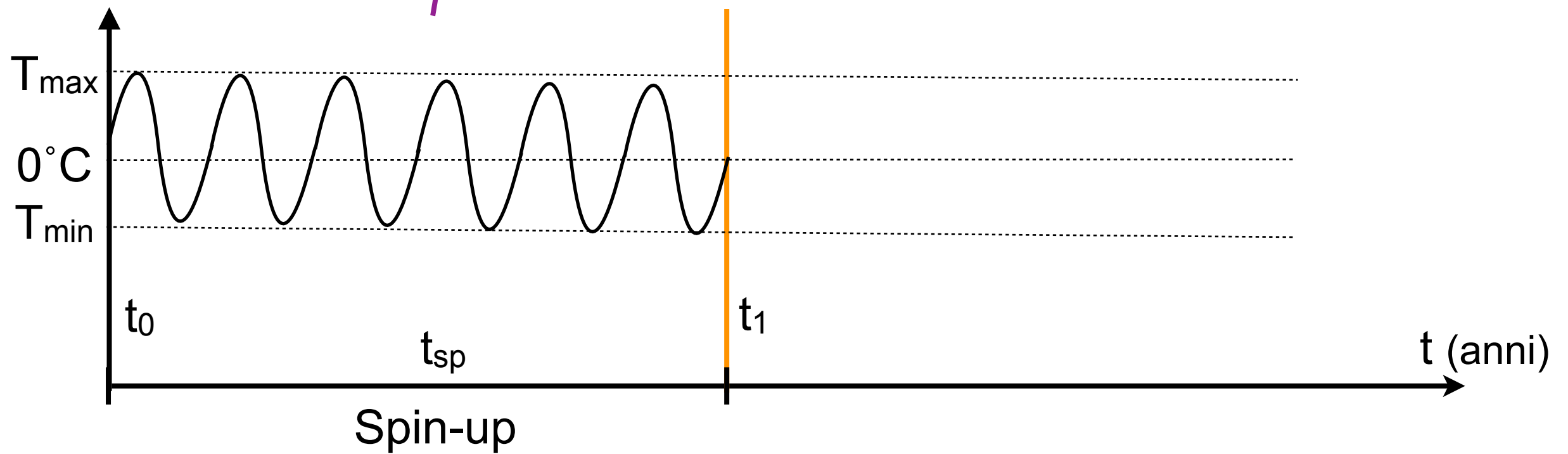
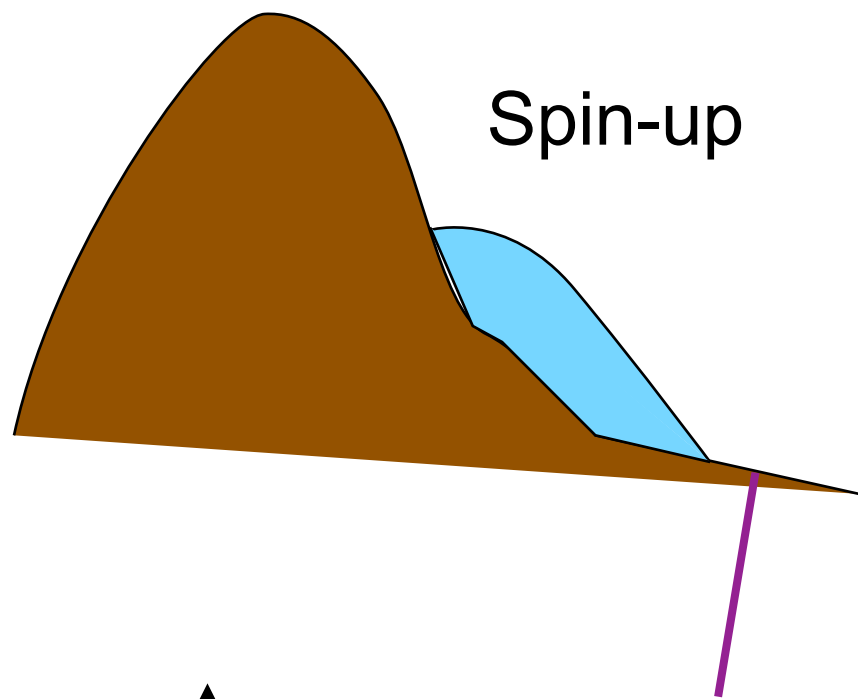
Profondità di inizializzazione

$$Z_{sp} := \max\{z_f \mid |T_m(z_f, t_{sp}) - T_{an}(z_f, t_{sp})| < \epsilon\}$$

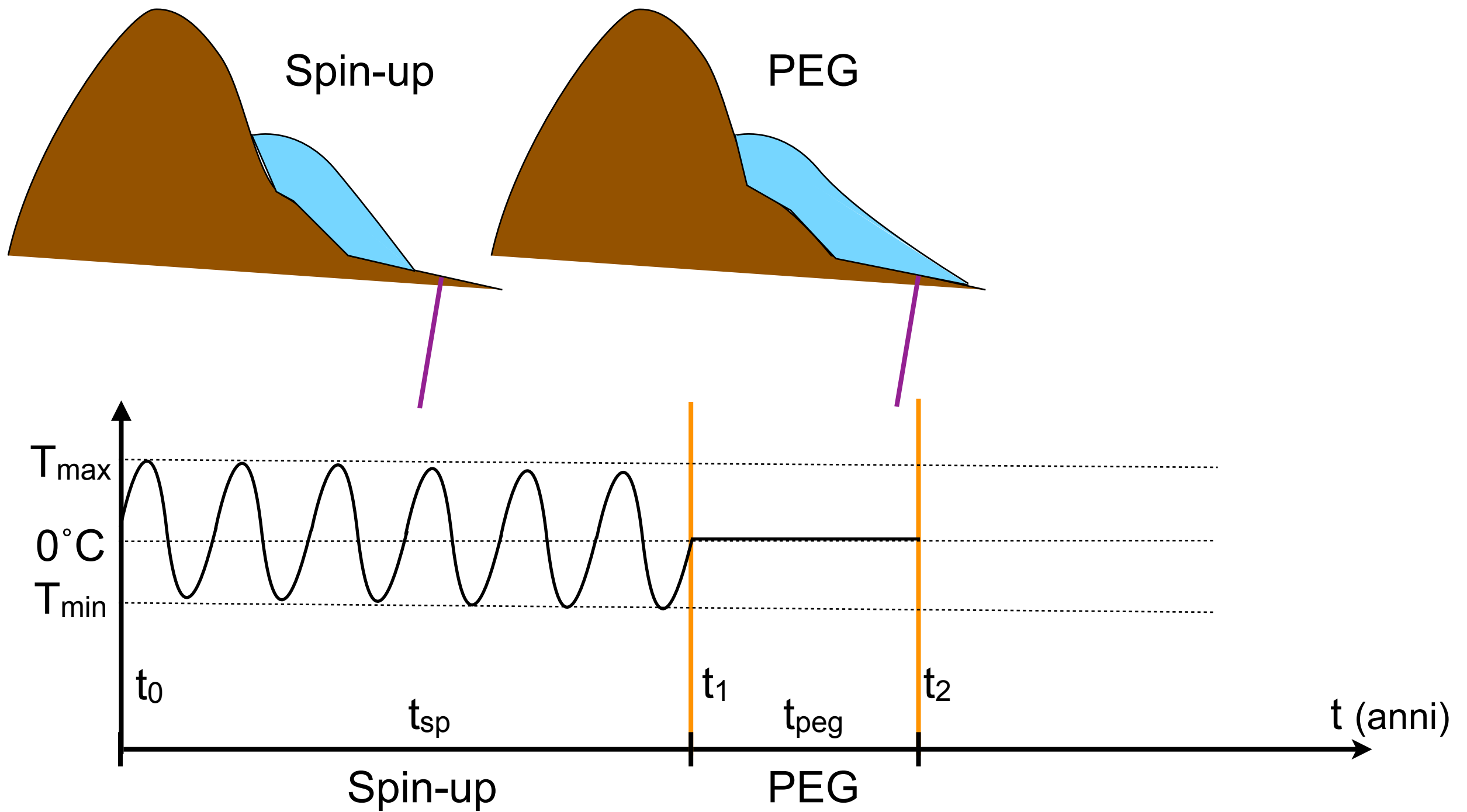




# Inizializzazione (Spin-up)

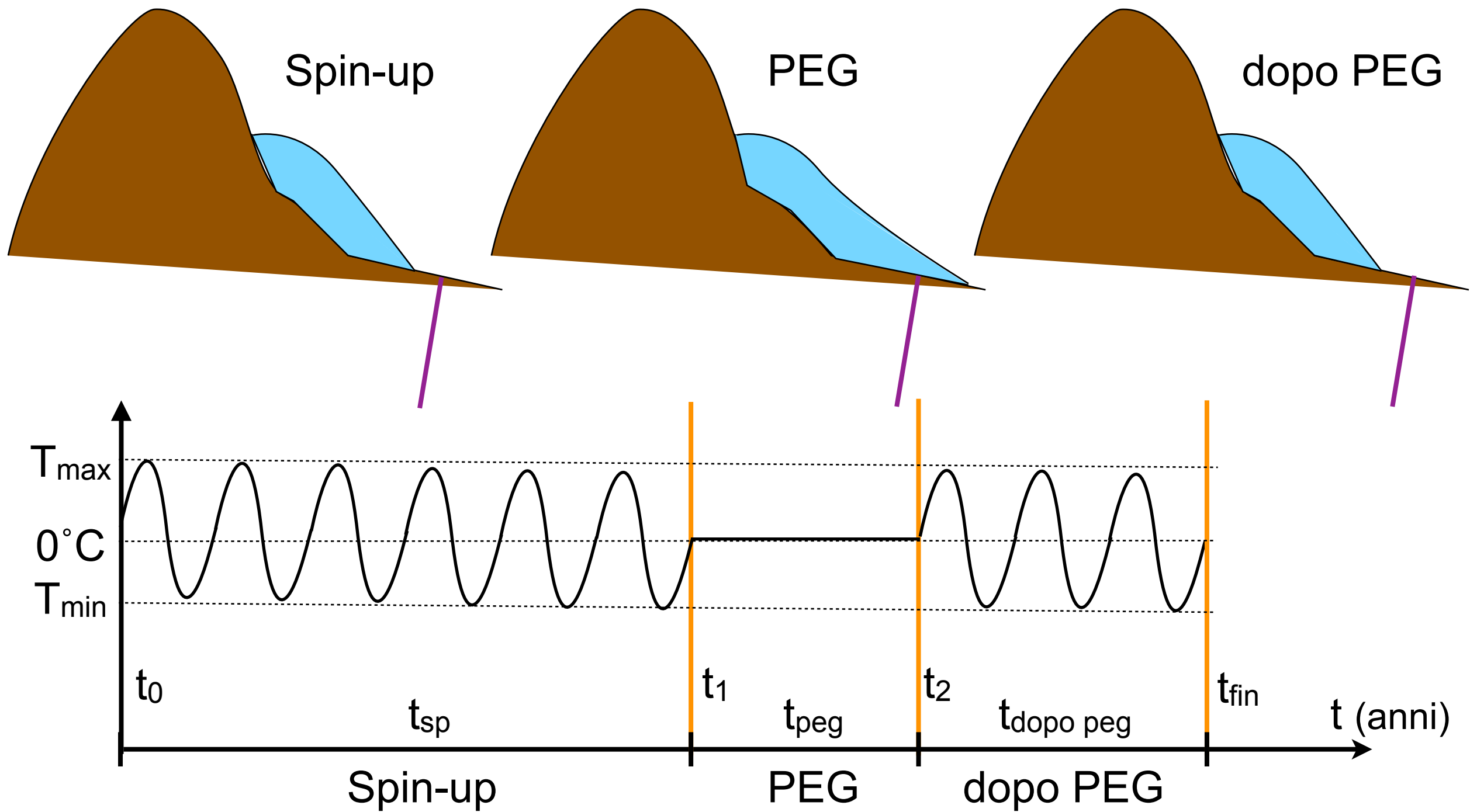


# Inizializzazione (Spin-up)

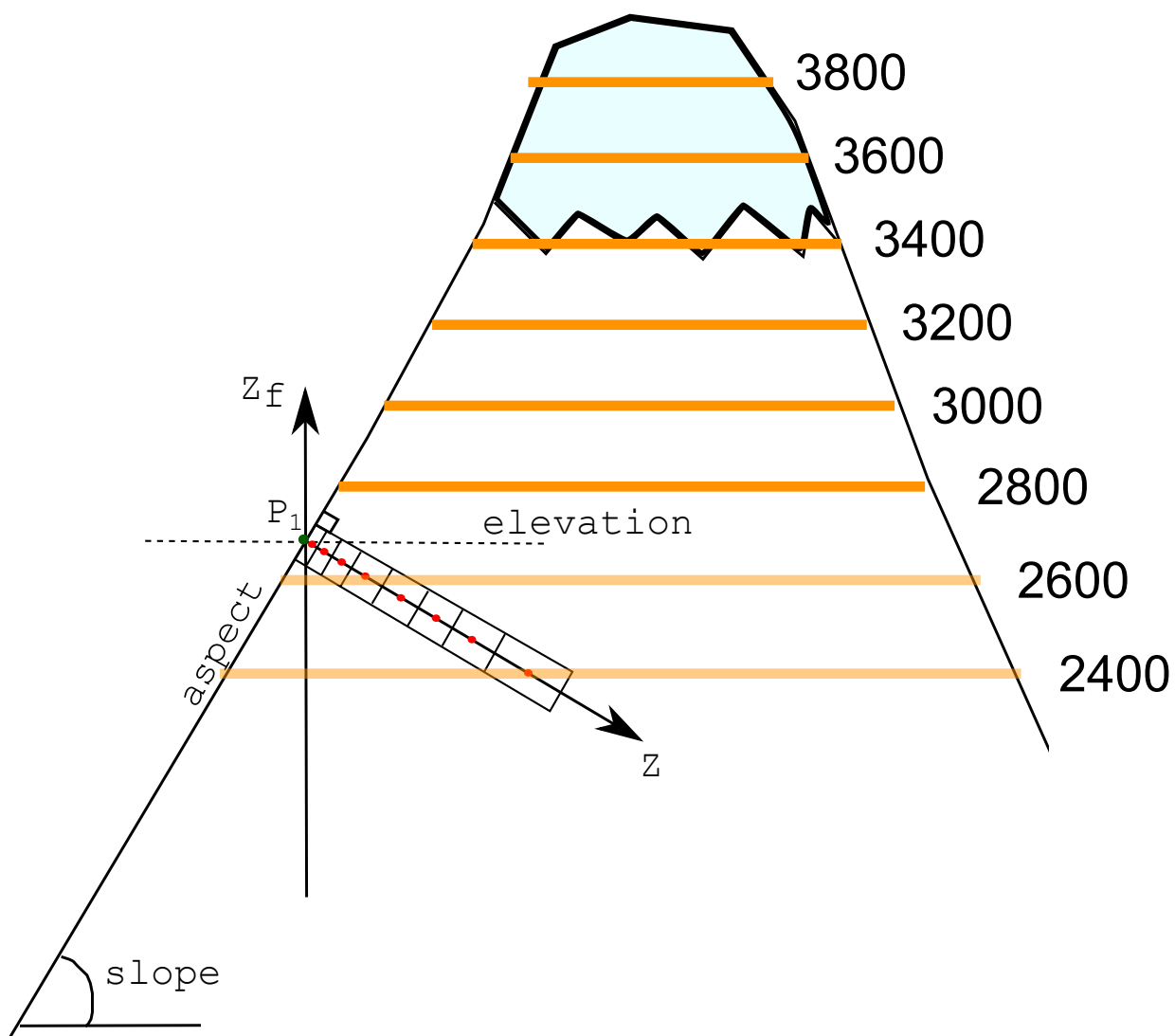




# Inizializzazione (Spin-up)



# Simulations in various conditions

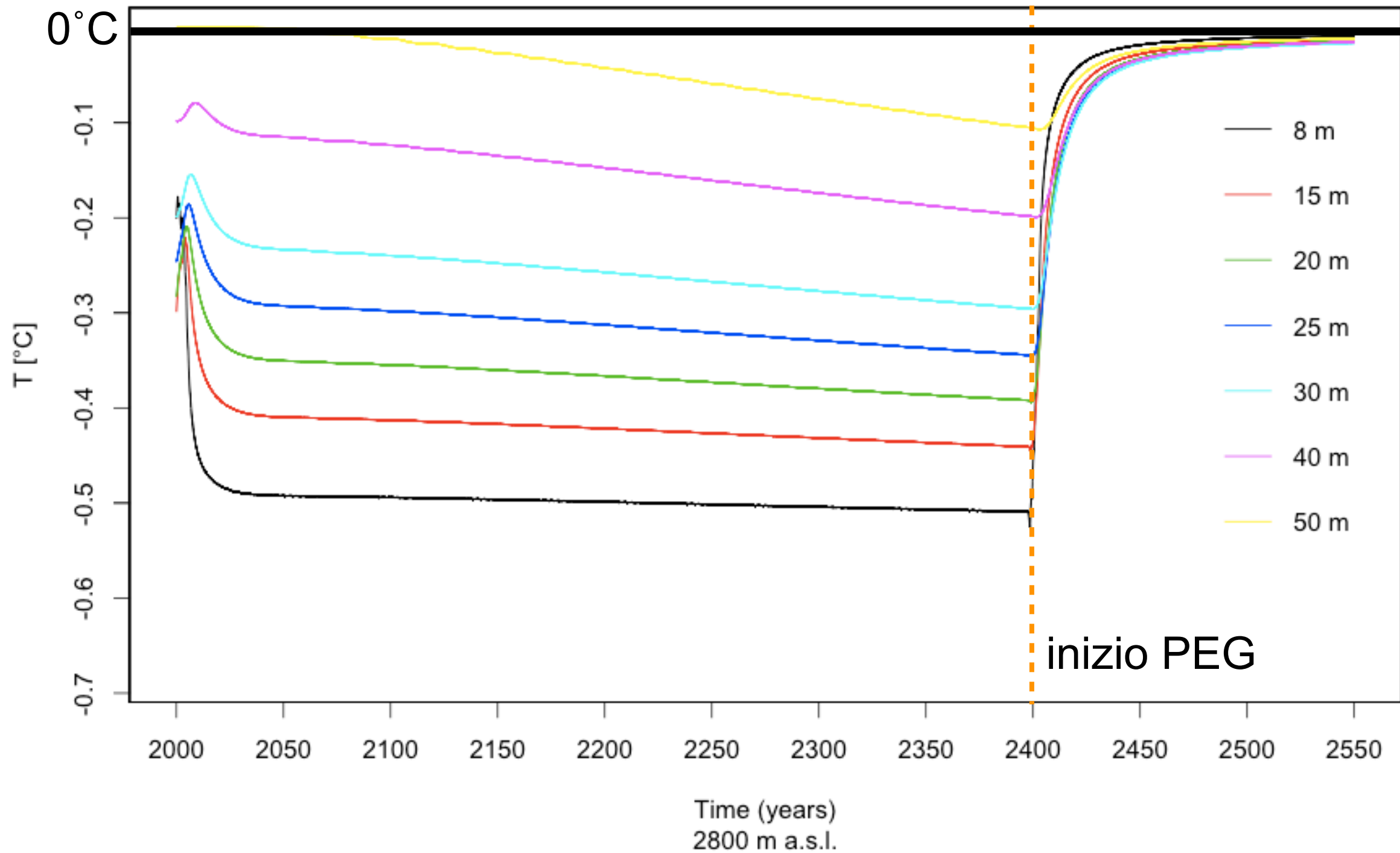


quota	MAAT	$\Delta T$	$T_{max}$	$T_{min}$
2400	1.5	7.10	5.05	-2.05
2600	0.5	6.75	3.91	-2.84
2800	-0.5	6.40	2.64	-3.76
3000	-1.5	6.05	1.50	-4.50
3200	-2.5	5.70	0.35	-5.35
3400	-3.5	5.35	-0.82	-6.18
3600	-4.5	5.10	-1.95	-7.05
3800	-5.5	4.65	-3.18	-7.83



# Durante PEG

Temperature trend 2800 m



# Stato attuale

Altitude	ALD( $t_1$ ) (m)	ALD( $t_2$ ) (m)	ALD( $t_{fin}$ ) (m)
2400	$T(z_f, t) > 0 \forall t$	$T(z_f, t) > 0 \forall t$	$T(z_f, t) > 0 \forall t$
2600	$T(z_f, t) > 0 \forall t$	$T(z_f, t) > 0 \forall t$	$T(z_f, t) > 0 \forall t$
2800	3.3	$T(z_f, t) < 0 \forall t$	3.3
3000	2.4	$T(z_f, t) < 0 \forall t$	2.4
3200	1.6	$T(z_f, t) < 0 \forall t$	1.6
3400	0.9	$T(z_f, t) < 0 \forall t$	0.9
3600	0.2	$T(z_f, t) < 0 \forall t$	0.2
3800	$T(z_f, t) < 0 \forall t$	$T(z_f, t) < 0 \forall t$	$T(z_f, t) < 0 \forall t$

$$ALD(t^*) := \min\{ z_f \mid \forall t : t^* - 2 \text{ years} \leq t < t^* \Rightarrow T(z_f, t) < 0 \}$$



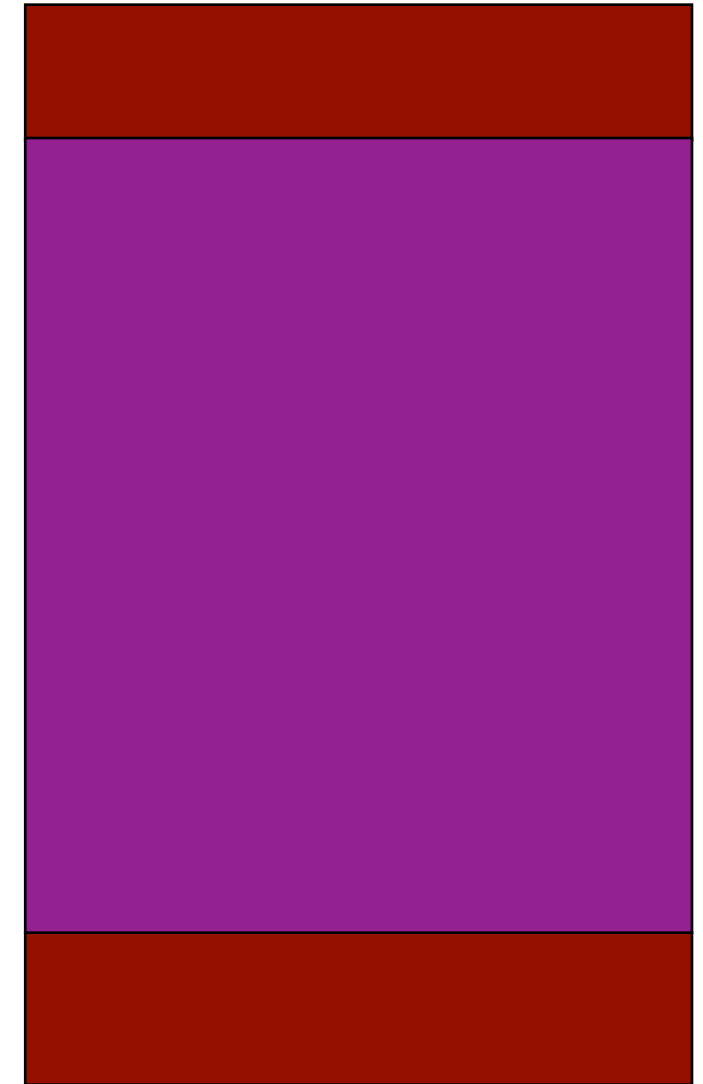
# Stato attuale

Spin-up

PEG

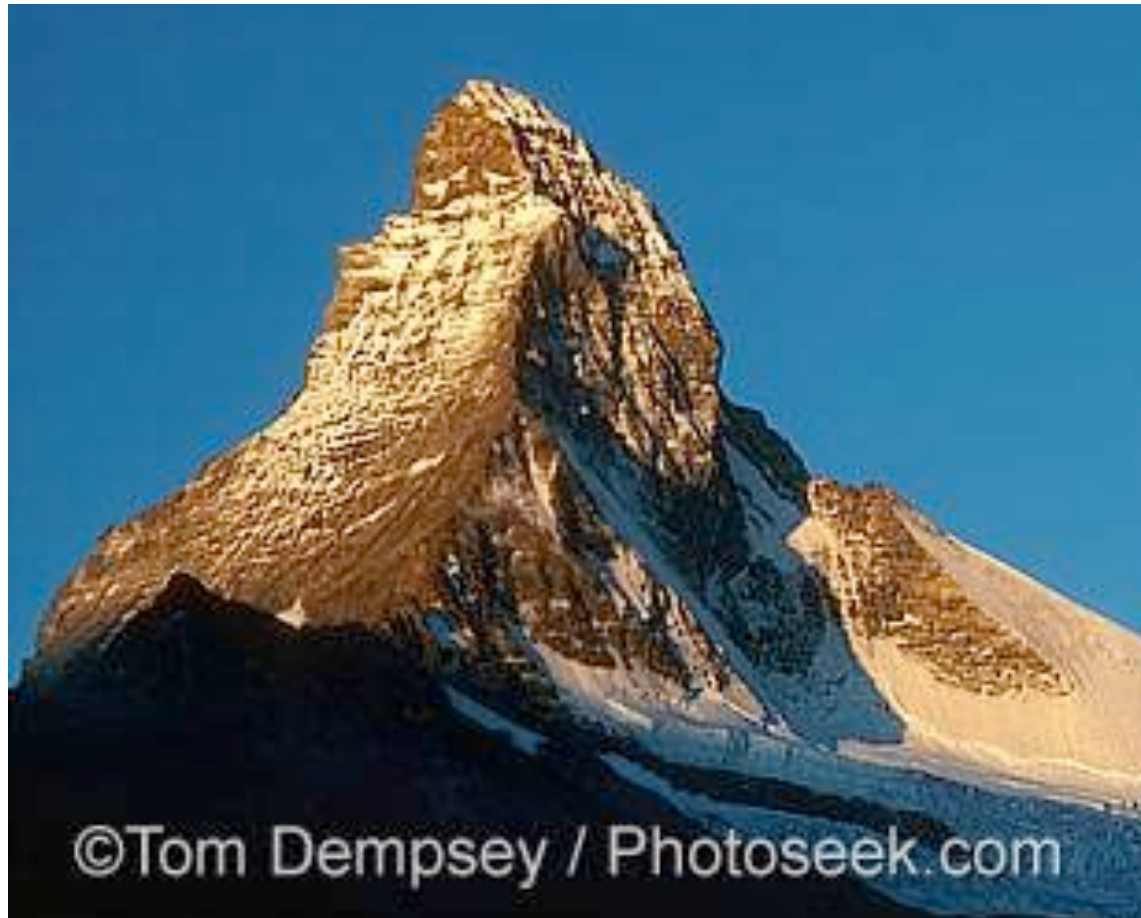
dopo PEG

strato  
attivo



# Sviluppi futuri

Mix **misure + modelli** per analisi interazione  
Permafrost vs dissesti naturali (crolli, sentieri, infrastrutture)





# GRAZIE DELL'ATTENZIONE