UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

CORSO DI LAUREA IN VALORIZZAZIONE E TUTELA DELL'AMBIENTE E DEL TERRITORIO MONTANO

Genesi dei suoli nelle aree proglaciali del Monte Bianco:

il caso del ghiacciaio del Miage

Relatore: Prof. Michele Eugenio D'Amico

Elaborato finale di:
Giulia Belotti
Matricola:
971001

Anno Accademico 2022/2023

Mais les vrais voyageurs sont ceux-là seuls qui partent
Pour partir; cœurs légers, semblables aux ballons,
De leur fatalité jamais ils ne s'écartent,
Et sans savoir pourquoi, disent toujours : Allons !

Charles Baudelaire

INDICE

RIASSUNTO 5
1.INTRODUZIONE 6
1.1. I suoli di montagna 6
1.2. Il cambiamento climatico e i suoli: l'importanza delle cronosequenze 8
1.3. Obiettivi dello studio 10
1.4. Studi precedenti 10
2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO 11
2.1. Il ghiacciaio 11
2.1.1. I debris covered glaciers 12
2.2. Evoluzione e fluttuazioni del Ghiacciaio del Miage in epoca Olocenica 16
3.MATERIALI E METODI 18
3.1. Area di studio 18
3.1.1. Inquadramento geologico 18
3.1.2. Vegetazione 19
3.1.3. Clima 20
3.2. Attività sul campo 21
3.3. Analisi di laboratorio 21
3.3.1. pH in H_2O 21
3.3.2. Bulk Density 22
3.3.3. Carbonio e azoto organici 22
3.3.4. Calcare totale 23
3.3.5. Stock di Carbonio 23
3.3.6. Tessitura 24
4.RISULTATI E DISCUSSIONE 25
4.1. Profili pedologici 26
4.1.1 Miage 0 26
4.1.2. Miage 1 28
4.1.3. Miage 2 31
4.1.4. Miage 3 32
4.1.5. Miage 3-Bis 35
4.1.6. Miage 4 37
4.1.7. Miage 5 39
4.1.8. Miage 6 41
4.1.9. Miage 8 44

4.2. Discussione dei risultati 47
4.2.1. Proprietà del suolo lungo la cronosequenza 47
4.2.2. Classificazione dei suoli WRB 49
4.2.2.1. Eutric Skeletic Regosol 50
4.2.2.2. Albic Podzol 50
5. CONCLUSIONI 51
APPENDICE 52
BIBLIOGRAFIA 54
RINGRAZIAMENTI 57

RIASSUNTO

Il presente studio è stato effettuato con l'obiettivo di andare ad analizzare lo sviluppo dei suoli in corrispondenza dell'anfiteatro morenico del Miage (MMA), uno dei sistemi più completi a scala olocenica dell'intera catena Alpina, e creare una scheda poi inserita nel contesto della mostra "*Adieu des Glaciers: Mont Blanc*", visitabile presso il Forte di Bard (AO).

A questo scopo, dopo un'analisi preliminare della zona e delle sue caratteristiche geomorfologiche, sono stati effettuati campionamenti *in situ* seguendo la cronosequenza delle morene, in modo da averne un quadro rappresentativo. I campioni così raccolti sono stati analizzati nei laboratori del Ges.Di.Mont e del DiSAA dell'Università Statale di Milano, in modo da poter valutare le caratteristiche fisico-chimiche dei suoli e il loro sviluppo nel tempo.

Nel corso dell'analisi dei risultati sono stati inquadrati i maggiori processi pedogenetici occorsi nel sito di studio, andando a verificare un'evoluzione dei suoli molto più rapida di quella osservabile nella gran parte dell'arco alpino.

Difatti, le analisi effettuate evidenziano un avvento da parte della vegetazione molto rapido, con conseguenti processi di acidificazione del suolo, oltre che una parziale tendenza alla podzolizzazione nei suoli più antichi (fino a 4700 ya BP). L'aumento dello stock di carbonio è rapido ma 4700 anni non sono sufficienti per raggiungere i valori medi dei suoli forestali alpini. L'insieme di questi fattori evidenzia l'importanza del sistema morenico del Miage, che può essere considerato un vero e proprio interessantissimo "laboratorio a cielo aperto", valorizzabile in molteplici modi soprattutto in un'epoca di cambiamenti climatici ed ambientali.

1.INTRODUZIONE

La formazione di un suolo deriva dall'integrazione di processi pedogenetici a breve e a lungo termine, che comportano una continua variazione delle proprietà intrinseche del suolo.

Secondo Hans Jenny (1941), esiste un'equazione in grado di descrivere i fattori che influenzano lo sviluppo dei suoli:

$$S=f(cl,o,r,p,t,...)$$

dove:

- **S** = una qualunque proprietà del suolo
- **cl** = clima
- **o** = organismi
- **r** = topografia (intesa come rilievi, dall'inglese *relief*)
- **p** = roccia madre (dall'inglese *parent material*)
- **t** = tempo (momento iniziale della formazione di un suolo)
- **...** = altri fattori, di importanza locale

Questi fattori, nell'insieme, agiscono sulla velocità e sulla direzione della pedogenesi.

1.1 I suoli di montagna

L'ambiente montano è caratterizzato, dal punto di vista climatico, da temperature generalmente basse e precipitazioni molto variabili a livello locale, oltre che fortemente dipendenti dalla morfologia dei rilievi e dall'altitudine.

L'evoluzione dei suoli montani è particolarmente lenta, anche a causa della ridotta attività biologica e delle basse temperature, specialmente in condizioni svantaggiate ed in erosione, dove il processo pedogenetico può essere pressoché assente; sono suoli molto fragili, che di conseguenza subiscono in maniera particolarmente intensa l'effetto dei disturbi, siano essi di origine antropica o naturale, quale per esempio il cambiamento climatico.

I suoli montani, peraltro, sono caratterizzati da una notevole variabilità a causa dei vari fattori di formazione variabili a piccola scala, a partire da materiale parentale, vegetazione, processi erosivi

e, successivamente, in base ai differenti tempi di formazione associati soprattutto all'andamento dei ghiacciai nel corso del tempo.

Nonostante tutte le informazioni fornite dal suolo, quindi, ricostruire l'evoluzione dei suoli alpini è particolarmente complesso, in quanto gran parte di suoli e delle forme precedenti all'ultima glaciazione sono stati distrutti dai processi erosivi dei ghiacciai. Gran parte dei suoli alpini è, in genere, molto giovane, con processi pedogenetici risalenti all'incirca tra i 12 e i 10 ka BP (Poulenard et al., 2005).

Osservando un differente punto di vista, i suoli sono fondamentali in quanto forniscono, oltre ad un vero e proprio "archivio storico" delle dinamiche evolutive, una grande varietà di servizi ecosistemici, primi tra tutti la funzione ecologica e di supporto alla biodiversità, sia sopra che sotto la superficie terrestre. I servizi ecosistemici forniti dai suoli si espandono su larga scala, partendo dall'insieme dell'apparato agricolo sino a giungere alla capacità del suolo di sequestrare carbonio, rendendolo un vero e proprio *sink* di CO_2. Si può difatti parlare di servizi ricreativi e turistici, di ritenzione dell'acqua e controllo del *runoff*, di regolarizzazione del clima e di produzione di biomassa, sia legnosa che agricola.

Assume quindi particolare importanza l'ipotesi di avanzare una serie di buone pratiche con l'obiettivo di massimizzare il buon utilizzo del suolo e dei servizi da esso forniti, prevenendo l'erosione, la malagestione e le conseguenti problematiche che ne deriverebbero, con ripercussioni anche gravi sull'intero ecosistema.

1.2. Il cambiamento climatico e i suoli: l'importanza delle cronosequenze

In un periodo storico dove è particolarmente importante il concetto di "cambiamento climatico", non si può non pensare agli effetti che questo andrà ad avere anche a livello dei suoli, specialmente in ambienti altimontani dove lo scioglimento del permafrost e i cambi vegetazionali porterebbero, più che in altri ambienti, a rapidi e drammatici cambiamenti nei processi pedogenetici.

Uno degli effetti maggiormente visibili del riscaldamento globale è senza dubbio il ritiro dei ghiacciai, continuato pressoché ininterrottamente a partire dalla fine della Piccola Età Glaciale (LIA), all'incirca a metà del XIX secolo. Per poterne predire l'andamento futuro e per poter valutare l'effettivo impatto del cambiamento climatico sull'habitat, è peraltro fondamentale studiare le fluttuazioni passate dei ghiacciai; se però procedere studiando il bilancio di massa dei ghiacciai è poco sostenibile sul lungo periodo e piuttosto dispendioso (Steiner, 2005), i dati sull'estensione dei ghiacciai sono invece molto più semplici da ottenere, e possono risalire sino al XVI secolo.

Le superfici lasciate scoperte dal progressivo ritiro nelle aree proglaciali offrono la possibilità di osservare lo sviluppo delle proprietà dei suoli e le dinamiche ecosistemiche; difatti habitat caratterizzati da età molto differenti coesistono in ambienti ristretti, riducendo l'effetto degli altri fattori, geografici e climatici (D'Amico et al., 2014). Gli ecosistemi glaciali, peraltro, possono essere considerati "geomorfositi", in quanto esibiscono tutte le caratteristiche che rendono un determinato ambiente di interesse geomorfologico (Panizza, 2001).

Le cronosequenze osservabili possono essere considerate un "laboratorio a cielo aperto", dando la possibilità di studiare in modo approfondito le fasi dello sviluppo del suolo, andando a validare le teorie sullo sviluppo degli ecosistemi e permettendo di determinare la velocità dei processi pedogenetici e della colonizzazione vegetale.

Nelle aree proglaciali di tutto il mondo sono state osservate e studiate un gran numero di cronosequenze, a partire dalle zone artiche, dove sono stati indagati principalmente i processi di podzolizzazione, e giungendo sino alle Alpi. In queste ultime, sono stati effettuati molti studi riguardanti lo sviluppo dei suoli e degli ecosistemi nelle zone proglaciali in foreste subalpine (Egli et al., 2003, 2006), mentre solo una piccola parte è andata ad indagare gli ambienti alpini (Caccianiga et al., 2006).

In anni recenti, lo studio delle cronosequenze e dei geomorfositi è andato ad assumere, oltre che all'ovvio interesse scientifico, anche un ruolo piuttosto importante in ambito educazionale e turistico. I risultati dei vari approcci differenti sono andati poi a confluire in un unico grande progetto

di rivalutazione dell'ambiente glaciale; la stessa rapidità evolutiva dello scenario glaciale assume qui importanza differente: va infatti, in un'ottica di turismo educazionale, a rappresentare perfettamente il concetto di tempo, oltre che a sensibilizzare in modo efficace al cambiamento climatico e alle sue conseguenze.

FIGURA 1: ESEMPIO DI GEOMORFOSITO NELL'AREALE DEL GHIACCIAIO DEL MIAGE; LAGO DI MIAGE (FOTO GIULIA BELOTTI, 2022)

1.3. Obiettivi dello studio

Lo studio si è concentrato nell'area del Ghiacciaio del Miage, collocato nel versante meridionale del massiccio del Monte Bianco. Il ghiacciaio, caratterizzato da un forte regresso negli ultimi anni, è dotato di uno dei sistemi morenici più completi a scala olocenica nell'intera catena alpina.
In loco sono state scelte aree di studio il più rappresentative possibile dell'ambiente circostante, allo scopo di prelevare campioni utili alla descrizione del grado di sviluppo dei suoli.
Lo studio è dunque consistito nella descrizione e nella caratterizzazione di questi suoli, allo scopo di osservare come, nello stesso ambiente, il tempo abbia influito differentemente nella pedogenesi.

1.4. Studi precedenti

L'areale del Monte Bianco è stato descritto da numerosi studi sin dal XVIII secolo, quando gli inglesi Windham e Pococke e il francese Martel hanno effettuato dei primi tentativi di descrivere il versante francese del massiccio. I primi studi riguardanti le fluttuazioni dei ghiacciai e gli anfiteatri morenici sono attribuibili a De Saussure e Forbes (1843), che hanno creato delle vere e proprie pietre miliari nello studio glaciologico della zona.
Durante il XIX e il XX secolo sono stati effettuati numerosi studi nell'area del Ghiacciaio del Miage (Baretti, 1880; Sacco, 1917), coadiuvati, come fonte informativa, anche dall'annuale bollettino (sin dal 1914) del Comitato Glaciologico Italiano (CGI), contenente informazioni e misurazioni del fronte glaciale, oltre che fotografie e documenti cartografici.
Una delle fonti più accurate riguardanti l'apparato morenico del Miage è la pubblicazione di Deline ed Orombelli, a partire dal 1999, che ha indagato accuratamente la zona, identificando e datando le morene più antiche, oltre che analizzando le dinamiche e le fluttuazioni del ghiacchiaio in epoca Olocenica.

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

2.1. Il ghiacciaio

Il ghiacciaio del Miage (45°47'N, 6°52'E), collocato nel versante meridionale del Monte Bianco, copre una superficie di circa 11 km^2 (Vivian, 1975), ed è per estensione il terzo ghiacciaio italiano.

FIGURA 2: GHIACCIAIO DEL MIAGE (VISTA DA SOPRA AL LAGO DEL MIAGE); (FOTO GIULIA BELOTTI, 2022)

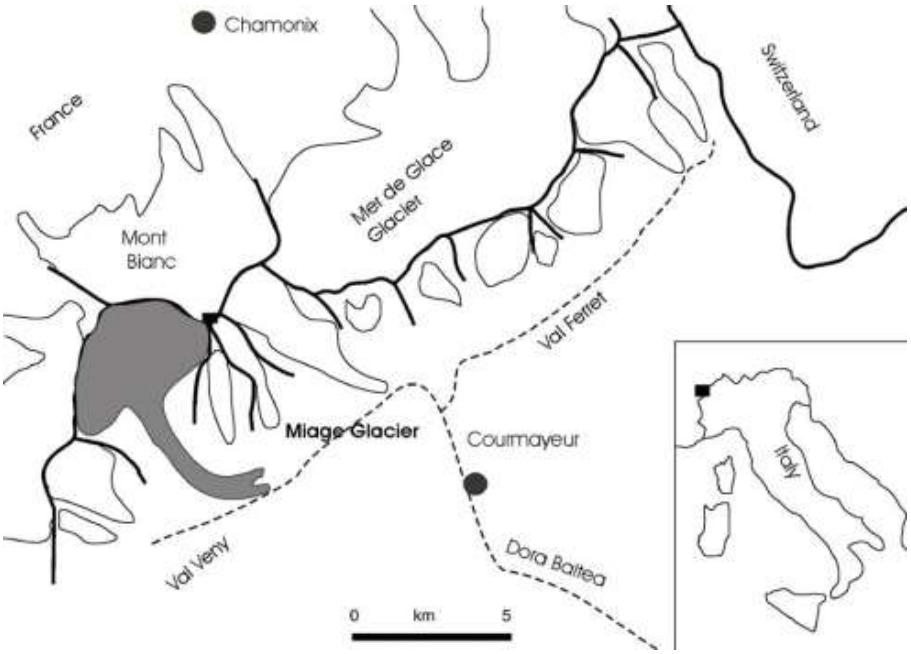


FIGURA 3: LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DEL GHIACCIAIO DELLA MIAGE

Si origina dal ghiacciaio di Bionnassay e lungo la sua discesa viene alimentato dal ghiacciaio del Dome de Miage e dal ghiacciaio del Monte Bianco. Confluisce a circa 2500 metri di quota, in un'unica lingua, che lo inquadra come incassato in una valle rettilinea che scende fino ad immettersi nella Val Veny. Qui si espande a formare i tre lobi terminali. Il lobo Nord, la cui fronte è a circa 1775 metri di quota, e il lobo Sud, che giunge fino a 1730 metri circa, delimitano il *Jardin du Miage,* in cui si spinge il lobo mediano, più piccolo.

2.1.1. I debris covered glaciers

Per ghiacciaio nero (o, appunto, *debris covered glacier*) si intende un ghiacciaio che veda oltre il 50% del bacino di ablazione coperto di detriti rocciosi di granulometria e spessore variabili (Benn & Evans, 2010); studiata inizialmente solo in Asia e in Nuova Zelanda, questa tipologia glaciale si sta diffondendo anche sulle Alpi successivamente ai processi di deglaciazione in atto, che concausano instabilità dei versanti e degradazione fisica delle rocce incassanti (Diolaiuti et al., 2003).

Il Miage è considerato il ghiacciaio nero più grande delle Alpi Italiane, con una copertura di detrito roccioso che supera i 4 km^2, similare solo ai grandi ghiacciai asiatici; è difatti coperto di detriti dai 1800 metri della fronte sino ad oltre 2400 metri di quota, ed è stato oggetto di frequenti studi volti a caratterizzarne la copertura detritica. Tra questi di particolare interesse quello effettuato tra il 2008 ed il 2011 dall'Università di Torino, con l'obiettivo di ottenere una carta geomorfologica

aggiornata dell'intero bacino glaciale e una carta dell'assetto della copertura detritica (in scala 1:10000) aggiornata al 2008 (Perotti et al., 2011).

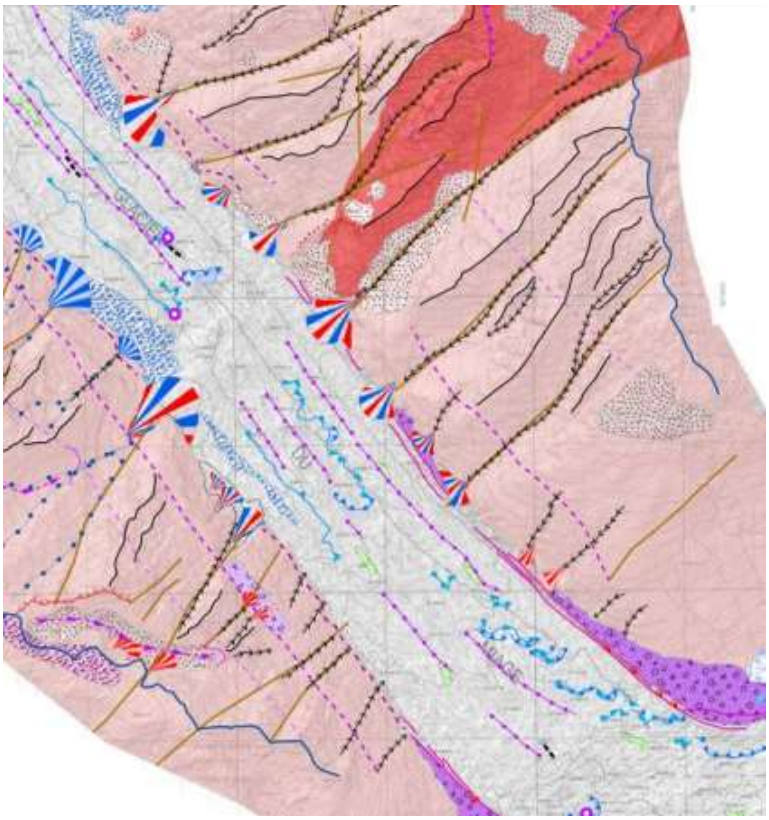


FIGURA 4: ESTRATTO DALLA CARTA GEOMORFOLOGICA (1:10000); (PEROTTI ET AL., 2011)

La copertura detritica è particolarmente disomogenea sia a livello cromatico e litologico che a livello granulometrico.

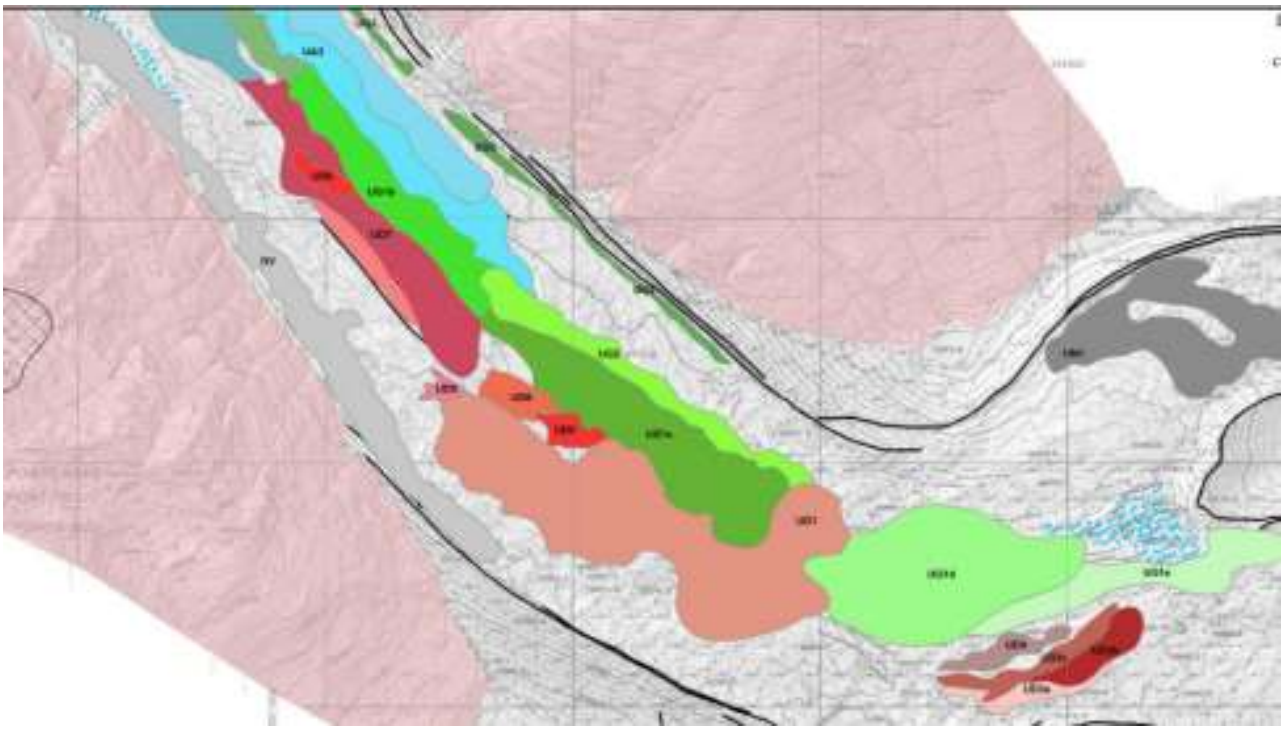


FIGURA 5: ESTRATTO DELLA CARTA DELLE COPERTURE DETRITICHE (1:10000); OGNI UNITÀ HA UN DIVERSO COLORE E CODICE IDENTIFICATIVO; (PEROTTI ET AL., 2011)

Per quanto riguarda la litologia del detrito, è strettamente connessa alla tipologia della roccia da cui è originato: difatti nel bacino del Miage sono presenti diversi tipi di roccia, principalmente metamorfica, tra cui: gneiss, cloritoscisti, scisti cristallini neri, scisti bianchi, scisti ocra, anfiboliti, quarziti e graniti (Deline, 2002).

Lo studio delle origini e delle caratteristiche del detrito permette di differenziare diverse aree omogenee, originabili da distinti eventi di crollo.

Il Miage non è stato sin dalla sua origine un ghiacciaio nero, ma ha acquisito solo di recente la sua copertura detritica. Durante il periodo finale della Piccola Età Glaciale (1770-1850) il detrito costituiva un velo discontinuo, che assunse tratti più omogenei in corrispondenza dei lobi frontali solo verso la fine del XXIX secolo. Nel corso degli anni la copertura è andata poi inspessendosi e risalendo verso monte, raggiungendo quella che è la posizione attuale.

FIGURA 6: COPERTURA DETRITICA DEL GHIACCIAIO DEL MIAGE (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

La variazione della copertura detritica è controllata principalmente dal bilancio di massa e dal bilancio detritico; per quanto riguarda il primo, il ghiacciaio, in base alla positività o negatività del suddetto, conosce fasi di ablazione o di trasporto dominanti. Per quanto riguarda invece il controllo detritico, è dipendente dai cicli di gelo/disgelo millenari che sono responsabili dell'evoluzione del permafrost nelle pareti rocciose.

L'effetto congiunto di questi due processi è un aumento dell'estensione e della densità della copertura detritica epiglaciale.

La risposta dei ghiacciai neri alle variazioni climatiche è generalmente molto ritardata rispetto a quella dei ghiacciai bianchi, e si presenta in modo differente: è difatti di solito meno chiara, e si presenta come variazione di spessore più che da movimenti longitudinali della fronte.

La copertura detritica ha difatti un effetto fondamentale nell'isolamento termico, portando ad un calo sensibile dell'ablazione superficiale; per questo motivo il ghiacciaio della Miage si spinge fino a quote molto basse, superando il limite vegetazionale e addossandosi ai cordoni morenici laterali deposti durante il periodo di massima espansione storica (nel corso della Piccola Età Glaciale); in questo modo si crea un'interessante habitat per artropodi e piante, che normalmente riescono a colonizzare areali ad altitudini superiori.

2.2. Evoluzione e fluttuazioni del Ghiacciaio del Miage in epoca Olocenica

Da oltre un secolo le fluttuazioni glaciali d'epoca olocenica sono considerate come un'anticipazione dei cambiamenti climatici (Orombelli, 2011); nonostante questo, la scarsità di dati spesso non permette lo studio dei processi avvenuti.

Per quanto riguarda le Alpi Occidentali, le variazioni dei ghiacciai databili precedentemente alla Piccola Età Glaciale sono pressoché sconosciute.

Il ghiacciaio della Miage è caratterizzato da un piccolo anfiteatro morenico che è stato studiato per oltre due secoli, e si è scoperto composto da tre sistemi di cerchi subconcentrici di circa 25 morene (Deline & Orombelli, 2005). Grazie alla sua localizzazione e alla modalità di accumulo, l'anfiteatro della Miage è uno dei più lampanti e meglio mantenuti esempi delle dinamiche glaciali durante l'epoca neoglaciale (circa 5000 anni BP); difatti studi geomorfologici hanno permesso la ricostruzione delle maggiori fluttuazioni del ghiacciaio del Miage durante la seconda metà dell'Olocene, quando l'associazione di periodi freddi e sviluppo della copertura detritica hanno portato alla presente espansione del bacino della Miage.

Il particolare interesse destato da quest'anfiteatro morenico, legato al suo passato uso come fortificazione nel XVII secolo, ha portato ad un gran numero di studi che sono andati ad indagarne la cronologia.

Le più datate sono attribuibili a Forbes (1843), che mappò solo 4 "antiche morene", mentre studi più recenti sono attribuibili a Sacco (1917), Kinzl (1932), Mayr (1969) e Capello (1952).

Gli studiosi presero qui diverse posizioni: Sacco datò all'inizio del XVI secolo la separazione del Miage dal massiccio del Monte Bianco, e datò l'anfiteatro morenico (con 17 costituenti) al XVII secolo. Capello, al contrario, considerò la base dell'anfiteatro morenico come parte di una morena frontale databile ad un avanzamento Tardoglaciale (post-Daun) del Miage.

In anni più recenti[1] sono state effettuate datazione al carbonio delle morene, utilizzando due approcci complementari (Deline & Orombelli, 2005): al lavoro di campo sulle superfici, che fornì dati sugli sviluppi più recenti, vennero affiancati carotaggi nei sedimenti del paleolago del Combal, in modo da avere informazioni sugli stadi più anziani.

[1] Successivamente agli anni '70

FIGURA 7: PALEOLAGO DI COMBAL (GIULIA BELOTTI, 2022)

Site no. (depth, m)	Material	Laboratory no.	$\delta^{13}C$ VPDB (‰)	Uncalibrated age (1σ years BP)	Calibrated age (2σ, years) (BP)	(AD/BC)	Source
1 (−0.70)	Wood	UZ-397		295±55	496–5	AD 1454–1945	Aeschlimann (1983)
1 (−0.80)	Wood	UZ-396		760±50	760–574	AD 1190–1376	Aeschlimann (1983)
2 (−0.50)	Wood	UZ-335		465±55	618–337	AD 1332–1613	Aeschlimann (1983)
2 (−0.80)	Wood	UZ-334		690±60	727–549	AD 1223–1401	Aeschlimann (1983)
3 (−0.90)	Charcoals	ARC-1521	−25.00	1720±40	1713–1530	AD 237–420	Deline (1999a)
4 (−0.55)	Charcoals	GX-24380	−24.60	2025±115	2326–1711	376 BC–AD 239	Orombelli & Deline (2002)
4 (−1.00)	Charcoals	GX-26209	−25.00	2300±150	2748–1934	798 BC–AD 16	Orombelli & Deline (2002)
5 (−1.45)	Wood	GX-26203	−24.60	1720±110	1882–1354	AD 180–428	Orombelli & Deline (2002)
5 (−3.10)	Wood	GX-26204*	−26.60	1480±40	1506–1295	AD 444–655	Orombelli & Deline (2002)
5 (−3.70)	Wood	GX-26205	−25.30	1710±130	1922–1314	AD 28–636	Orombelli & Deline (2002)
5 (−4.10)	Wood	GX-26206	−23.80	1820±70	1920–1560	AD 30–390	Orombelli & Deline (2002)
5 (−4.70)	Wood	GX-26207	−25.30	1960±60	2041–1738	91 BC–AD 212	Orombelli & Deline (2002)
5 (−5.10)	Wood	GX-26208*	−26.50	2070±40	2147–1928	198 BC–AD 22	Orombelli & Deline (2002)
6 (−4.25)	Grass	LY-10664	−26.37	2515±45	2748–2362	798–412 BC	This article
C (−6.48)	Peat	LY-10421	−27.89	1340±55	1332–1172	AD 618–778	This article
C (−47.42)	Peat	LY-1905 OxA*	−28.48	4240±45	4866–4648	2916–2698 BC	This article
C (−57.16)	Peat	LY-10248	−26.50	4265±75	5029–4575	3079–2625 BC	This article

*AMS radiocarbon date.

FIGURA 8: DATI DALLE ANALISI AL CARBONIO RADIOATTIVO EFFETTUATE NEL MMA E NEI SEDIMENTI DEL LAGO COMBAL (DELINE & OROMBELLI, 2005)

Lo studio della cronologia, rapportata ai dati della letteratura sugli avanzamenti e i ritiri dei ghiacciai alpini durante l'Olocene, ha portato alla formulazione di un "Nuovo modello Neoglaciale" (Deline & Orombelli, 2005), con fasi distinte rispetto ad altre regioni alpine.

3.MATERIALI E METODI

3.1. Area di studio

Lo studio pedologico è andato ad interessare l'area proglaciale e periglaciale del Ghiacciaio del Miage, in particolare andando ad aprire profili in corrispondenza delle 12 morene identificate in letteratura; le analisi sono state effettuate con la finalità di valutare le caratteristiche, la natura e il grado di sviluppo dei suoli, in modo da definirne una classificazione e costruire cronofunzioni per le loro principali caratteristiche(i.e. funzioni che descrivono lo sviluppo dei suoli o di alcune loro caratteristiche nel tempo); per ogni profilo sono stati osservati sul campo i limiti superiori ed inferiori degli orizzonti riscontrati, la quantità di scheletro presente, il colore (tramite l'utilizzo delle Tavole Munsell), l'eventuale presenza di radici (e loro dimensione e frequenza) e la struttura.

3.1.1. Inquadramento geologico

Il Ghiacciaio del Miage, per estensione terzo in Italia, è un ghiacciaio nero (o *"debris-covered glacier"*), la cui copertura detritica deriva dai versanti rocciosi sovrastanti, dominati dai graniti del Monte Bianco nel settore nord-orientale e da gneiss metamorfico in quello sud-occidentale. Il materiale morenico da cui si originano i suoli è quindi dominato da rocce silicatiche, ma con diversa alterabilità, da poco alterabile, molto ricco in quarzo (graniti del Monte Bianco) a più alterabili e più ricchi in miche e feldspati gneiss.

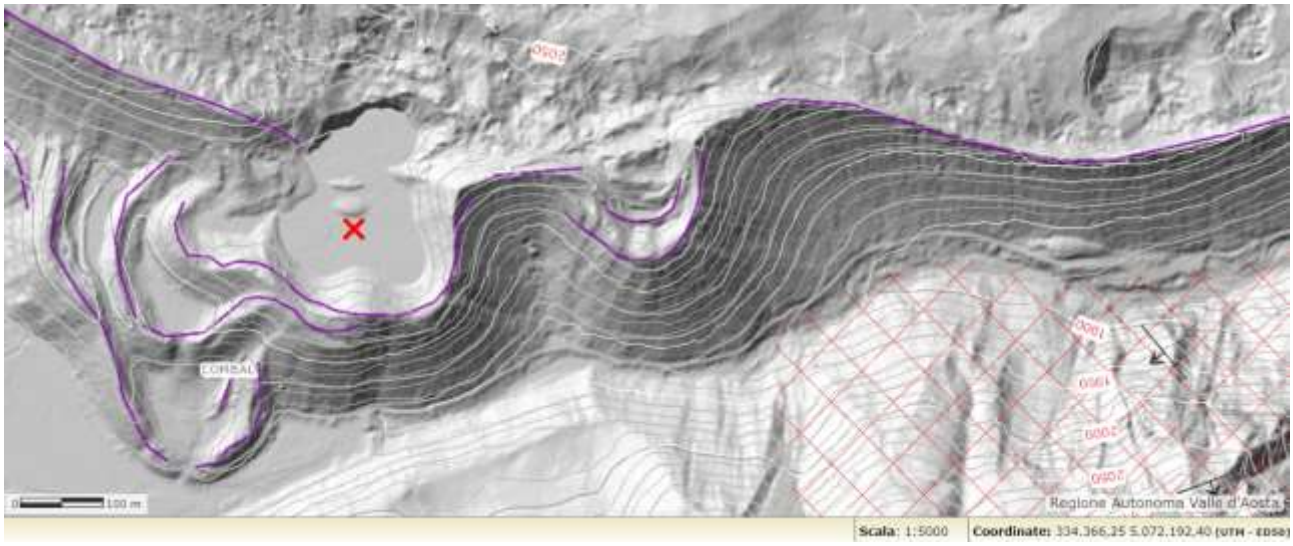


FIGURA 8: ESTRATTO DELLA CARTA GEOLOGICA VDA, SCALA 1:5000; BACINO DEL MIAGE

3.1.2. Vegetazione

Per quanto riguarda l'aspetto vegetazionale, i lobi Nord e Sud del Miage sono colonizzati da una rada vegetazione erbacea, presente anche in quota, e da specie arboree quali *Larix decidua*, *Picea excelsa*, *Salix spp*., *Populus tremula* e *Betula pendula.*

Per frequenza, la specie maggiormente diffusa è il larice, che nelle Alpi ha un areale piuttosto vasto, riuscendo a raggiungere le quote maggiori ed a colonizzare efficacemente anche suoli nudi. Difatti la rinnovazione naturale e la colonizzazione sono particolarmente facili su suoli minerali, come quelli morenici, grazie anche all'alimentazione tramite funghi micorrizogeni, molto presenti.

La natura di ghiacciaio nero del Miage ha particolare influenza anche sull'aspetto vegetazionale: la coltre detritica possiede infatti caratteri di elevata instabilità, oltre ad avere nella zona immediatamente sottostante il ghiaccio, che rende difficoltoso l'accrescimento delle radici e rende meno stabili gli individui.

Si è inoltre notato, dalle osservazioni in campo, che nella zona esposta a Sud è presente una, seppur giovane, componente arbustiva (principalmente composta da *Ericaceae*) piuttosto sviluppata, assente invece nelle morene esposte a Nord, colonizzate principalmente da *Trifolium cespitosum* e da giovani larici.

FIGURA 10: VEGETAZIONE DELL'AREA DI STUDIO; *LARIX DECIDUA* (FOTO GIULIA BELOTTI, 2022)

3.1.3. Clima

Secondo la classificazione climatica di Köppen–Geiger la regione di Courmayeur, che comprende l'area del ghiacciaio del Miage, può essere classificata con "*Dfc*", ovvero un clima boreale o sub-artico, con assenza di una stagione arida e corte estati, compensate da lunghi inverni piuttosto rigidi e con abbondanti nevicate (Società Metereologica Subalpina, 2003). Le temperature medie rilevate in corrispondenza delle stazioni della zona spaziano tra una media di 19°C a luglio e -0,5°C a gennaio (Portale dati CF VDA, dati estrapolati a settembre 2023).

Le precipitazioni sono relativamente scarse, con minimi poco marcati nei mesi estivi; nell'arco dell'anno si valutano all'incirca 1300 mm di precipitazioni totali, con una tendenza in leggero calo nell'arco degli ultimi anni (nel 2022 le precipitazioni totali si sono assestate sui 1000 mm). Gran parte di queste precipitazioni, a differenza che nel resto delle Alpi Italiane, sono prodotte da venti Occidentali e Nord-Occidentali, di origine Atlantica, grazie alla vicinanza con lo spartiacque più occidentale dell'arco alpino.

3.2. Attività sul campo

I profili pedologici sono stati aperti con lo scopo di raccogliere campioni rappresentativi secondo i metodi standard FAO (FAO, 2006), ponendo particolare attenzione al riconoscimento di elementi che potessero fornire informazioni sui processi evolutivi avvenuti in corrispondenza di ciascun suolo. Sono stati raccolti, nel totale, 27 campioni. Parallelamente è stata effettuata un'attenta analisi delle caratteristiche geomorfologiche dell'area, in modo da poter contestualizzare i dati ottenuti successivamente in laboratorio.

3.3. Analisi di laboratorio

Le analisi sono state effettuate nei laboratori del DiSAA dell'Università Statale di Milano e del Ges.Di.Mont, seguendo protocolli standard (Società della Scienza del Suolo, 2000).

3.3.1. pH in H_2O

Il Ph, o logaritmo negativo in base 10 della concentrazione in *moli/L* di ioni idrogeno presenti nella fase liquida, permette di organizzare i campioni secondo la classificazione USDA.

La misura è stata effettuata, come da protocollo, tramite tecnica potenziometrica, sfruttando un pH-metro immerso in una sospensione formata da acqua distillata e suolo in proporzione 1:2.5, posta in agitazione per 30 minuti.

Classificazione del grado di reazione	Grado di Reazione (pH in acqua)
Estremamente acida	< 4.5
Molto fortemente acida	4.5 - 5.0
Moderatamente acida	5.1 - 6.0
Debolmente acida	6.1 - 6.5
Neutra	6.6 - 7.3
Debolmente alcalina	7.4 - 7.8
Moderatamente alcalina	7.9 - 8.4
Fortemente alcalina	8.5 - 9.0
Molto fortemente alcalina	> 9.0

TABELLA 1: CLASSIFICAZIONE DEI SUOLI SU BASE PH (USDA)

3.3.2. Bulk Density

La Bulk Density, ovvero la densità della terra fine di un campione, espressa in *g/cm*^{3}, è stata calcolata a partire dal prelievo in campo di campioni di volume noto di suolo indisturbato (100 cm^3), tramite l'utilizzo di un cilindretto standard. Ciò è stato possibile solo in due casi, altrimenti lo scheletro era eccessivo per permettere la penetrazione del cilindro metallico nel suolo.

Il campione è stato successivamente essiccato in stufa a 105° e pesato. Il calcolo della bulk density è stato realizzato al netto della massa e del volume dello scheletro del campione, eliminato tramite l'utilizzo di un setaccio (Boone et al., 1999).

Questo metodo, seppur rapido ed accurato, presenta vari limiti legati alla variabilità dei risultati, dipendenti dal tipo di suolo e allo stato del terreno al momento dell'operazione di prelievo. Inoltre, la notevole percentuale di scheletro presente nelle aree di studio ha reso particolarmente complesso ottenere campioni analizzabili.

3.3.3. Carbonio e azoto organici

La determinazione della frazione organica è stata effettuata tramite l'utilizzo di un analizzatore elementare CHN. È uno strumento che determina il quantitativo percentuale di carbonio, azoto ed idrogeno tramite la combustione dei campioni, seguita da processi di ossidazione catalitica e riduzione. Successivamente è effettuata la separazione dei gas prodotti in colonna gas-cromatografica e l'analisi degli stessi con un rivelatore a conducibilità termica. I campioni sono preparati manualmente tramite la pesa di una quantità di suolo (macinato in modo da passare completamente da un setaccio con maglia di diametro pari a 0.425 mm) compresa tra 20 e 40 mg, che viene poi incapsulata in un involucro di stagno.

3.3.4. Calcare totale

La stima del Carbonio organico è da effettuarsi al netto dei carbonati contenuti nel suolo.

Il metodo si basa sulla misura della quantità di anidride carbonica che si libera dalla decomposizione dei carbonati in seguito all'aggiunta di un acido forte al campione di terreno. È molto importante in quanto i materiali calcarei, se presenti in eccesso, andrebbero ad inibire l'assorbimento del ferro e del fosforo, insolubilizzandoli ed innalzando il pH del suolo.

3.3.5. Stock di Carbonio

Per i suoli di cui è stata misurata la Bulk Density è stato possibile calcolare la quantità di C che essi contengono.

E' stata applicata la formula

$$Cstock = \left(\frac{TOC\left[\frac{g}{kg}\right] * BD\left[\frac{kg}{dm^3}\right] * Sp[dm]}{10} \right) * (1 - SK[\%])$$

(Pintaldi et al., 2021b)

dove TOC è la concentrazione di Carbonio organico (*g/kg*) dell'orizzonte, BD è la sua Bulk Density, TH il suo spessore (*m*) e VF è la frazione di terra fine del suolo, escludendo quindi la componente di scheletro (*1-SK%*).

3.3.6. Tessitura

La valutazione della tessitura permette di classificare un terreno in una classe tessiturale.

Classificazione U.S.D.A. (United States Department of Agricolture) del tipo di particella	*Dimensioni dei diametri medi delle particelle di terra*
Sabbia grossa	2,0 – 0.2 mm
Sabbia fine	0,2 – 0,05 mm
Limo grosso	0,05 – 0,02 mm
Limo fine	0,02 – 0,002 mm
Argilla	< 0,002 mm

TABELLA 2: CLASSIFICAZIONE GRANULOMETRICA (USDA)

Classe tessiturale	*Tipo di suolo*
Sabbia, Sabbia Fine (>70% sabbia)	Sabbioso
Limo (>80% limo)	Limoso
Argilla, AL, AS (> 40% argilla)	Argilloso
F, FS, FSA, FA, FLA, FL	Franco

TABELLA 3: CLASSIFICAZIONE DEL SUOLO PER CLASSE TESSITURALE (USDA)

Per effettuare la classificazione, una parte della terra fine di ogni campione (10.00 g) è stata posta in agitazione meccanica per due ore all'interno di una miscela di acqua e di sodio esametafosfato. L'analisi della granulometria apparente è stata dunque effettuata tramite il levigatore di Gattorta, basato sulla legge di Stokes, per cui la velocità di sedimentazione di una particella in un liquido a determinata viscosità, dipende dalla sua dimensione.

Per ogni analisi sono stati effettuati tre prelievi di 10 mL ciascuno, rispettivamente a 2 minuti, 10 minuti e 20 ore dall'inizio della misurazione. In questo modo sono state prelevate le varie componenti (prima il limo, poi l'argilla, infine la sabbia), che hanno diversi tempi di decantazione basati sulle proprietà e sulle dimensioni.

Infine i volumi prelevati sono stati posti a seccare in stufa a 105° per 24 ore e sono stati pesati, determinando dunque la percentuale in peso delle diverse classi granulometriche (sabbia grossolana 2.0-0.2 mm, sabbia fine 0.2-0.05 mm, limo grossolano 0.05-0.02 mm, limo fine 0.02-0.002 mm, argilla <0.002 mm). (Basile et al., 2015)

4.RISULTATI E DISCUSSIONE

Di seguito la caratterizzazione e la descrizione dei profili studiati, con i relativi risultati delle analisi di laboratorio.

La scelta dei siti è dovuta al fatto che l'anfiteatro morenico del Miage, nonostante le sue dimensioni relativamente ridotte (all'incirca 200000 m^2), ha un ruolo fondamentale nello studio delle fluttuazioni del ghiacciaio, grazie anche alla sua collocazione periferica all'interno del complesso del Miage (è difatti lontano dalla zona attiva, e di conseguenza non viene alterato da movimenti di massa).

Delle 25 morene identificate da Orombelli nel 2005, ne sono state scelte 12 tra le 3 cerchie di appartenenza, in modo da avere un campione il più rappresentativo possibile delle caratteristiche dei siti con età crescente, e si è proceduto raccogliendo informazioni e campionando in ordine cronologico, partendo dalle più recenti e procedendo poi a ritroso.

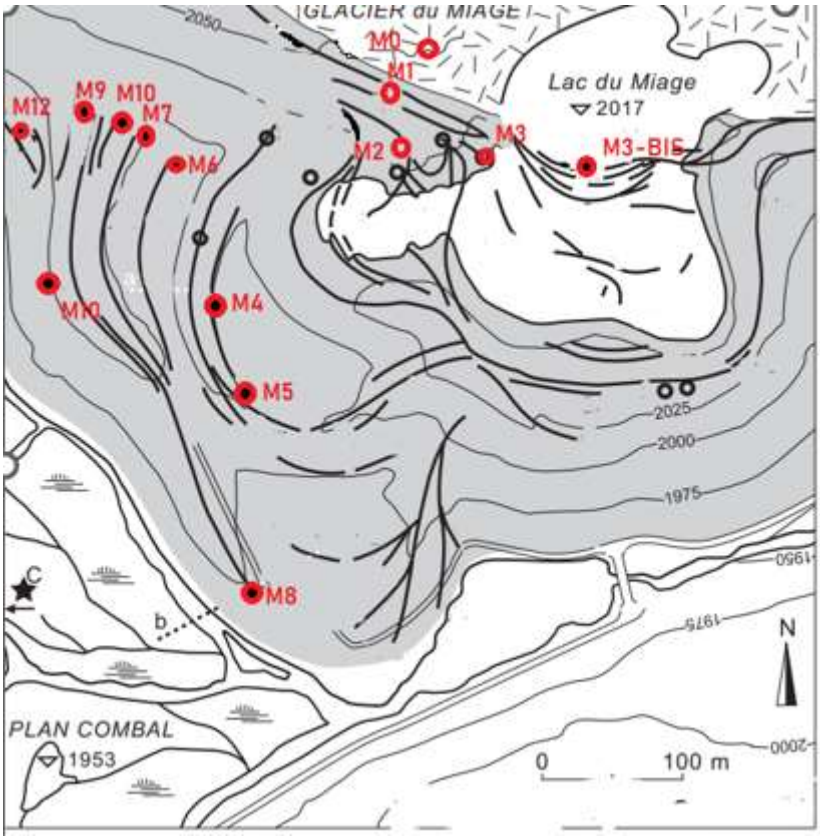


FIGURA 11: IMMAGINE DELLA GEOMORFOLOGIA DEL MMA; SONO SEGNALATE LE MORENE ANALIZZATE (ELABORAZIONE SU DELINE & OROMBELLI, 2005)

4.1. Profili pedologici

4.1.1 Miage 0

Il profilo è stato aperto in corrispondenza della fronte del ghiacciaio, sulla coltre detritica.

Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 4 e 5.

FIGURA 12: PROFILO E AREA CIRCOSTANTE DI MIAGE 0 (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

Orizzonte	Profondità (cm)	Descrizione
C@	0-30+	Colore 2.5Y 6/3 Assenza di vegetazione e radici Struttura laminare vescicolare, con presenza di aggregati con zone di vuoto causate da *push and pull* Per caratteristiche, suolo assimilabile grossolanamente ad un permafrost, data la presenza sottostante di ghiaccio

TABELLA 4: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 0

Orizzonte	pH	BD (kg/m^3)	Corg%	N%	C/N	Stock di C (kg/m^3)
C@	8,52	1590,21	0,138	0,048	3,648	0,099

TABELLA 5: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 0

FIGURA 13: STRUTTURA LAMINARE E POROSITÀ VESCICOLARE PER EFFETTO DEL GELO SUL SUOLO DI MIAGE 0 (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

4.1.2. Miage 1

Il profilo è stato aperto in una zona più stabile della precedente, seppur sempre localizzata sulla copertura detritica del ghiacciaio. Per questo motivo, a causa delle crioturbazioni, erano presenti nel suolo accumuli di limo.

La vegetazione era composta prevalentemente da *Trifolium cespitosum* e *Carex pendula*. E' stata inoltre riscontrata la presenza marginale di ife fungine.

Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 6 e 7.

FIGURA 14: PROFILO DI MIAGE 1 (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

Orizzonte	Profondità (cm)	Descrizione
OH	0-1	Irregolare e poco presente
A	1-1,5	A tasche Radici abbondanti, in particolar modo in presenza di *Trifolium cespitosum* e *Carex pendula*
CA	1,5-20	Colore 2.5Y 5/2 Struttura grumosa fine Radici fini comuni Consistenza soffice
C	20+	Colore 5Y 6/3 Struttura tendente al laminare per compattazione da gelo Limoso, a causa del deposito glaciale, con presenza di pochissima sabbia fine Scheletro pressoché assente a causa della compressione da ghiaccio

TABELLA 6: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 1

Orizzonte	pH	BD (kg/m^3)	Corg%	N%	C/N	Stock di C (kg/m^3))
A	7,25	989,56	1,723	0,136	12,644	0,068
CA	7,69	1379,81	0,334	0,05	6,903	0,768
C	8,02	1462,84	0,236	0,053	4,637	0,393

TABELLA 7: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 1

4.1.3. Miage 2

Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 8 e 9.

Orizzonte	**Profondità (cm)**	**Descrizione**
C1		Colore 2.5Y 5/2 Radici fini comuni Struttura assente
C2		Colore 5Y 5/2 Struttura assente, ma con una leggera tendenza alla granulare media Scheletro abbondante

TABELLA 8: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 2

Orizzonte	**pH**	**BD (kg/m^3)**	**Corg%**	**N%**	**C/N**	**Stock di C (kg/m^3)**
C1	8,02	1356,65	0,174	0,046	3,766	0,083
C2	8,02	1579,67	0,144	0,047	3,359	0,091

TABELLA 9: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 2

4.1.4. Miage 3

Nell'apertura del profilo, è stata riscontrata una pedogenesi molto più accentuata. Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 10 e 11.

L'area era vegetata prevalentemente a *Larix decidua*.

FIGURA 15: PROFILO DI MIAGE 3 (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

Orizzonte	Profondità (cm)	Descrizione
OL	0-2	
OF	0-7	
OF/OH	7-8	In transizione, abbastanza irregolare
EA	8-10	Colore 2.5Y 4/2 Non laminare Struttura primaria granulare fine
AC	10-20/25	Colore 2.5Y 5/3 Orizzonte C in transizione avanzata Struttura grumosa Radici fini comuni Limite inferiore non netto
C	20/25+	Struttura assente, sabbioso Scheletro 30% Radici fini medio-abbondanti

TABELLA 10: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 3

Orizzonte	pH	BD (kg/m^3)	Corg%	N%	C/N	Stock di C (kg/m^3)
OF/OH		468,99	15,349	0,702	21,873	0,200
AC	5,92	1225,49	0,692	0,058	11,95	0,772
C	5,70	1282,85	0,502	0,043	11,771	0,586

TABELLA 11: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 3

4.1.5. Miage 3-Bis

Il profilo è stato aperto nell'arco morenico che rimaneva, fino a pochi anni fa, sepolto da Lago di Miage, e presenta conseguentemente caratteristiche da deposito lacustre.

L'area è vegetata a larici, seppur molto più giovani di quelli che popolavano l'area in cui è stato aperto il profilo *Miage 3*.

Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 12 e 13.

FIGURA 16: PROFILO DI MIAGE 3-BIS (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

Orizzonte	Profondità (cm)	Descrizione
OH	0-0,5	
C1	0,5-5/10	Colore 5Y 5/2 Radici fini comuni Molto limoso, con segni di deposito lacustre e screziature sul grigio a profondità 4/5 cm circa struttura laminare grazie alla collocazione passata sub-lacustre Scheletro 10-15%
C2	5/10+	Colore 5Y 5/2 Cambio netto di consistenza rispetto all'orizzonte precedente, nonostante il limite irregolare; tendente al sabbioso Scheletro 10-15%

TABELLA 12: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 3-BIS

Orizzonte	pH	BD (kg/m^3)	Corg%	N%	C/N	Stock di C (kg/m^3)
C1	6,10	1385,53	0,326	0,043	7,662	0,307
C2	6,47	842,63	0,319	0,045	7,084	0,3

TABELLA 13: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 3-BIS

4.1.6. Miage 4

Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 14 e 15.

FIGURA 17: PROFILO DI MIAGE 4 (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

Orizzonte	Profondità (cm)	Descrizione
OF/OH	0,5-1	Irregolare Evidente struttura micogena laminare
E	1-3	Colore 2.5Y 3/1 Molto alterato, aderisce ad O Radici fini comuni Presenza di ife fungine diffuse
BA	3-15	Colore 2.5Y 4/3 Struttura granulare Scheletro 70%, molto abbondante Radici fini e medie comuni
CB	15+	Struttura poliedrica subangolare fine Scheletro 60% Fino a 25 cm, radici fini e medie comuni

TABELLA 14: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 4

Orizzonte	pH	BD (kg/m^3)	Corg%	N%	C/N	Stock di C (kg/m^3)
BA	5,51	1139,29	0,918	0,056	16,342	0,377
E		991,47	1,709	0,099	17,218	0,305
CB	6,10	1354,39	0,372	0,044	8,517	0,141

TABELLA 15: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 4

4.1.7. Miage 5

Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 16 e 17.

Orizzonte	**Profondità (cm)**	**Descrizione**
OL/OF/OH	0-2,5	OH micogeno, materasso fungino
E	2,5-5	Colore 5Y 5/1.5 Limite superiore abrupto, limite inferiore abrupto irregolare Scheletro circa 5 cm
B(s)	5-18	Colore 10YR 4/4 Limite inferiore graduale Struttura granulare e parziale poliedrica subangolare Scheletro 40%
C	18+	Colore 2.5Y 5/4 Scheletro molto accentuato, di dimensioni grossolane Struttura praticamente inesistente

TABELLA 46: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 5

Orizzonte	pH	BD (kg/m^3)	Corg%	N%	C/N	Stock di C (kg/m^3)
OF/OH		462,43	15,778	0,841	18,760	0,535
E		1147,29	0,888	0,071	12,561	0,242
B(s)	4,66	1138,86	0,920	0,065	14,055	0,817
C	5,13	1228,21	0,632	0,058	10,838	0,093

TABELLA 17: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 5

4.1.8. Miage 6

In questo sito, come nei successivi, si riscontra un brusco cambio vegetazionale, dovuto all'esposizione a Sud.

FIGURA 18: VEGETAZIONE DELLE MORENE ESPOSTE A SUD (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

La vegetazione è qui preponderante, ed è composta prevalentemente a *Larix decidua* ed *Ericaceae*.

Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 18 e 19.

FIGURA 19: PROFILO DI MIAGE 6 (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

Orizzonte	Profondità (cm)	Descrizione
OL/OF/OH	0-8	Presenza di radici grosse molto diffuse
A	8-9	Orizzonte di insolubilizzazione Paragonabile ad E per caratteristiche, mancando l'attività biologica
E	9-13/15	Colore 10 YR 4/6 Radici scarse Scheletro poco marcato Tessitura fine Alterato e compatto, massivo Privo di struttura
Bs1	15-35/40	Colore 10YR 4/6 Poroso e grossolano, *fluffy* Radici fini e medie comuni Scheletro 70%
Bs2	40+	Colore 10YR 3/6 Radici fini e medie comuni Molto grossolano Scheletro >80%

TABELLA 18: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 6

Orizzonte	pH	BD (kg/m^3)	Corg%	N%	C/N	Stock di C (kg/m^3)
O		804,30	30,662	1,48	20,721	1,843
E		636,79	1,604	0,088	18,319	1,114
Bs1	4,30	1006,60	7,584	0,29	26,195	2,608
Bs2	4,32	893,14	2,583	0,114	22,577	0,461

TABELLA 19: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 6

4.1.9. Miage 8

La vegetazione rimane pressoché inalterata, con presenza però di un processo di umificazione importante, che diviene comune all'intero versante.

Le caratteristiche e le proprietà fisico-chimiche sono descritte nelle Tabelle 20 e 21.

FIGURA 20: PROFILO DI MIAGE 8 (FOTO M.E. D'AMICO, 2022)

Orizzonte	Profondità (cm)	Descrizione
OL	0-1/2	
OF (nuova formazione)	2-4	
OF (vecchia formazione)	4-6	Molto irregolare
OH	3-6	Discontinuo ed irregolare
E	6-15	Colore 10YR 4/3 Limite superiore abrupto chiaro Struttura assente Radici fini e medie comuni Scheletro molto grossolano, 40%
Bs/Bhs	15-35	Colore 5YR 3/4 Orizzonti compresenti Limite superiore chiaro ondulato Radici medie e grosse comuni Chiazze organiche più scure dovute alla presenza di radici in avanzato stadio di decomposizione Struttura primaria granulare, secondaria poliedrica subangolare media Consistenza *crunchy*
C	35/37+	Colore 2.5Y 5/4 Limite superiore chiaro ondulato, struttura assente Scheletro 40%, di dimensioni medie e molto meno alterato Radici fini scarse o assenti

TABELLA 205: CARATTERISTICHE DEL SUOLO MIAGE 8

Orizzonte	pH	BD (kg/m^3)	Corg%	N%	C/N	Stock di C (kg/m^3)
Bs/Bhs	4,48	1052,57	1,322	0,077	17,219	1,948
E	4,23	938,73	2,133	0,098	21,747	1,081
C	5,00	1206,22	0,693	0,051	13,677	0,451

TABELLA 216: PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE DEL PROFILO MIAGE 8

4.2. Discussione dei risultati

Prendendo in analisi i risultati ottenuti nel corso delle analisi, possiamo considerarli sotto diversi aspetti.

Andando ad osservare la vegetazione, possiamo notare una graduale tendenza alla colonizzazione dei suoli, con picchi piuttosto elevati soprattutto per quanto riguarda le morene esposte a Sud (Profili *Miage 6-7-8-9-10-11-12*); un'eccezione è rappresentata da *Miage 3-bis*, che presenta esemplari di *Larix decidua* molto giovani rispetto al trend, fattore dovuto alla passata sommersione del sito nelle acque del Lago di Miage.

4.2.1. Proprietà del suolo lungo la cronosequenza

Per quanto riguarda le proprietà fisico-chimiche, si può denotare un calo nell'andamento del pH, correlato con il grado di sviluppo dei suoli e con la colonizzazione da parte di specie vegetali arboree ed arbustive che producono sostanza organica dal potere fortemente acidificante.

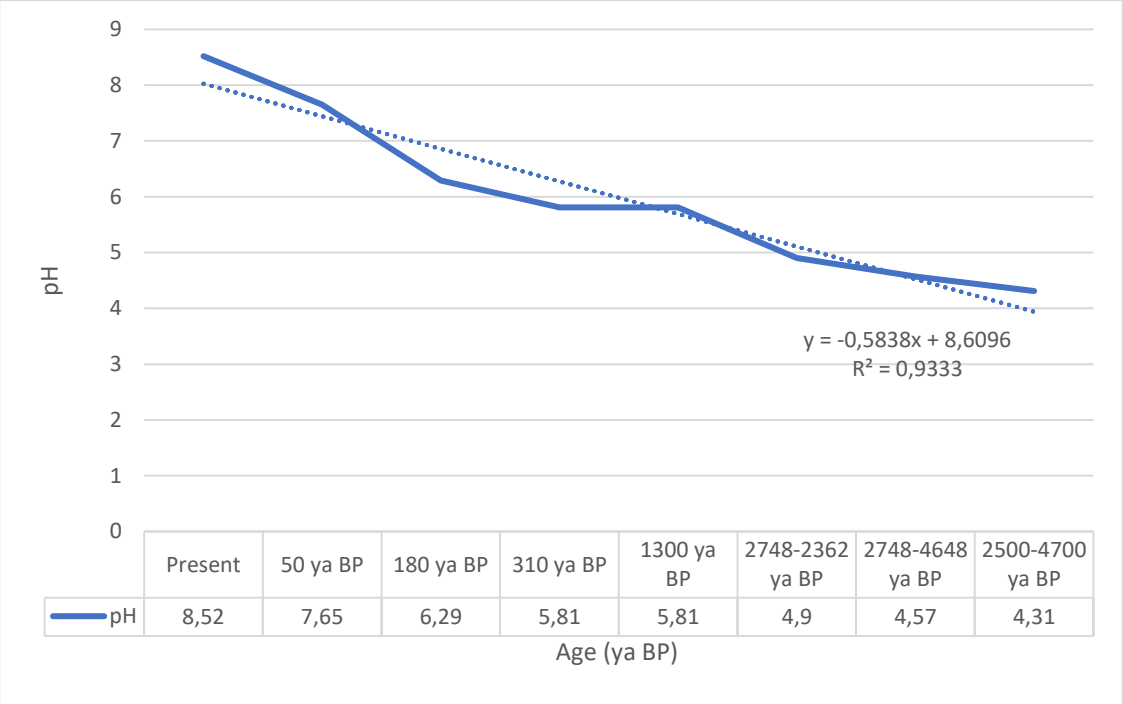


TABELLA 227: GRAFICO DELL'ANDAMENTO DEL PH, ELABORAZIONE EXCEL SU DATI DI LABORATORIO

Un'ottima velocità di sviluppo è confermata anche dai tassi dello stock di Carbonio nei suoli, che aumenta progressivamente con l'età delle morene. Si può concludere che 4000 anni non sono quindi sufficienti per raggiungere valori di stock di Carbonio paragonabili ai suoli forestali medi della Valle D'Aosta (stock di Carbonio pari a circa 8-15 kg/m^2; D'Amico et al., 2021)

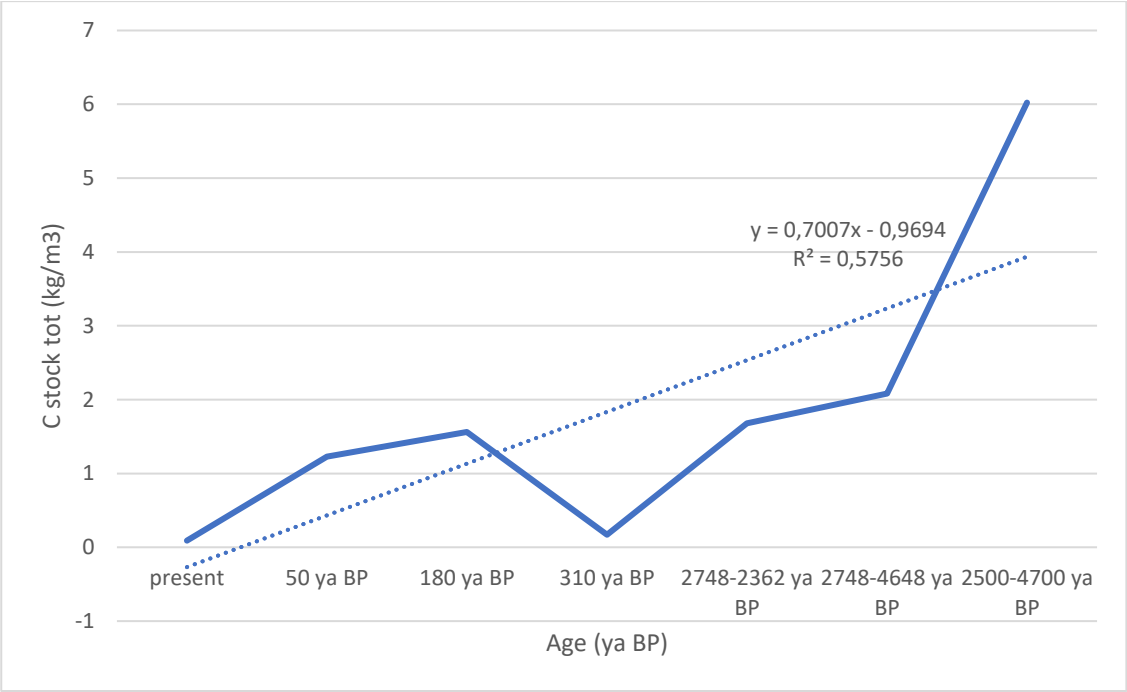


TABELLA 23: CARBON STOCK TOTALE, COMPRESI GLI ORIZZONTI ORGANICI SUPERFICIALI (ELABORAZIONE SU DATI EXCEL)

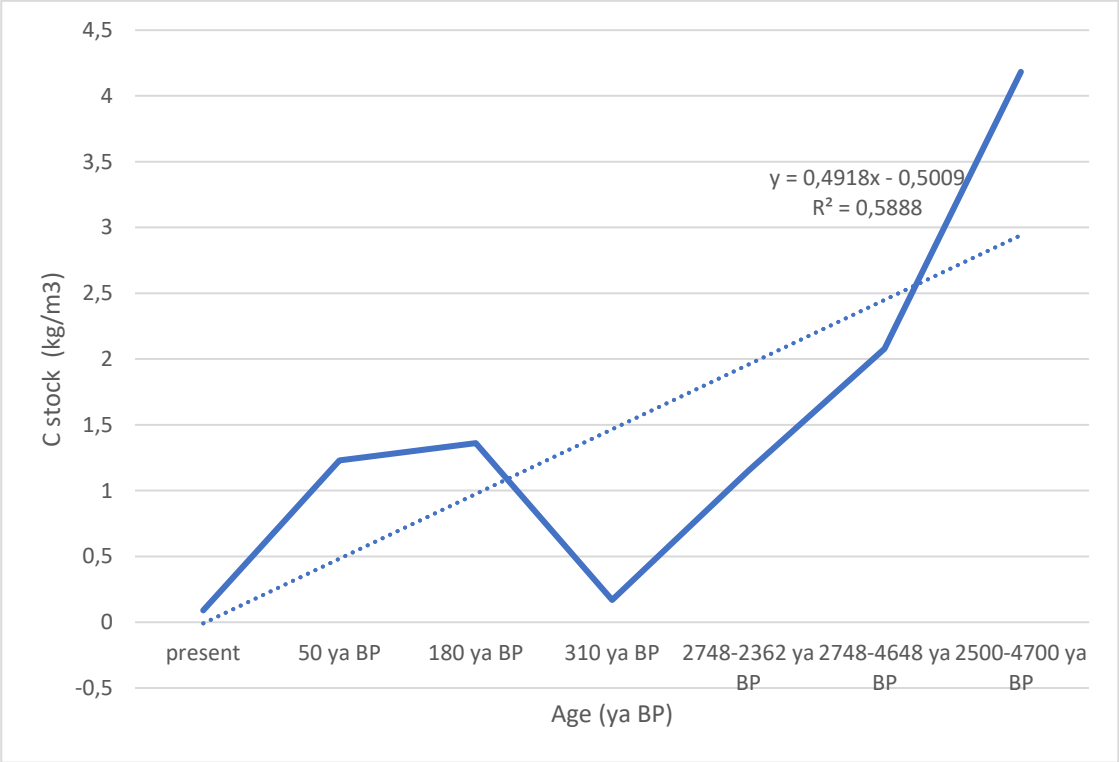


TABELLA 84: CARBON STOCK NEGLI ORIZZONTI MINERALI (ELABORAZIONE SU DATI EXCEL)

I valori dello stock si discostano dal *trend* in crescita solamente in corrispondenza della morena Miage 2, dove il suolo non mostrava tracce di pedogenesi di orizzonti organici, probabilmente anche a causa delle alterazioni al suolo causate dai movimenti erosivi successivi alla deposizione della morena.

Comparandolo ad altre cronosequenze (D'Amico et al.,2013), il contenuto in materia organica inizia a stabilizzarsi molto più lentamente; questo perché sopra la *treeline* la migrazione verso l'alto delle molecole organiche solubili è limitata, cosa coadiuvata anche dal fatto che la stessa vegetazione rada produce molta meno materia organica.

Il rapporto C/N è molto legato alla copertura vegetazionale, difatti i valori maggiori sono riscontrabili in corrispondenza degli orizzonti organici delle morene esposte a Sud (*Miage 5,6* e *8*), dove le aree erano densamente popolate da specie vegetali arbustive ed arboree, quali *Larix decidua* ed *Ericaceae*.

I valori minori sono rintracciabili invece nei suoli sovrastanti il ghiacciaio e nelle immediate vicinanze (*Miage 0,1* e *2*), dove gli orizzonti organici erano pressoché inesistenti. Il rapporto C/N è difatti caratteristica descrittiva di materiale organico in decomposizione, ricco in acidi a basso peso molecolare, ed è associato a valori di pH minori, quali per esempio quelli riscontrati nelle morene dai suoli più sviluppati e con vegetazione maggiore.

Conseguentemente, essendo che il fattore acidificante maggiore in suoli proglaciali è lo stesso acido originante dalla degradazione dei composti organici, la rapida decrescita del pH sotto la *treeline* è attribuibile ad uno sviluppo vegetazionale molto rapido, correlato ad una maggiore produzione di biomassa degradabile. Nonostante questo, è da segnalare il fatto che, analogamente ai suoli della cronosequenza del Lys, anche nei suoli più giovani della cronosequenza del Miage è riscontrabile un debole processo di acidificazione, attribuibile principalmente all'alterazione dei minerali e ai processi degradatori di precipitazioni e scioglimento nivale.

4.2.2. Classificazione dei suoli WRB

I suoli analizzati possono essere classificati utilizzando la nomenclatura *della WRB – World Reference Base for Soil Resources* (IUSS Working Group WRB, 2022) in base alle caratteristiche fisiche ed ai risultati delle analisi di laboratorio.

Tra i suoli analizzati si possono distinguere due macrocategorie:

4.2.2.1. Eutric Skeletic Regosol

Riconoscibili da una struttura e alterazione minerali poco sviluppate, i R*egosols* sono suoli caratteristici di zone morfologicamente giovani, disturbate e delle zone aride e semi-aride, oltre che delle regioni montane; sono rintracciabili, nel presente elaborato, nei suoli chiamati *Miage 0*, *Miage 1*, *Miage 2*, *Miage 3* e *Miage 3-Bis*.

Sono generalmente caratterizzati da un pH maggiore di 5.5, oltre che da un profilo poco sviluppato. Sono, nel nostro caso, suoli relativamente giovani, a basso contenuto di sostanza organica e con un'alta percentuale di scheletro.

4.2.2.2. Albic Podzol

Caratterizzati dalla presenza di un orizzonte spodico sottostante ad un orizzonte albico, sono riconoscibili facilmente anche dalla caratteristica colorazione *ash-grey* dell'orizzonte sottosuperficiale, causata dalla presenza di acidi organici. E' presente inoltre un orizzonte albico, con bassi contenuti di Fe e Mn e colorazione chiara.

Nel presente elaborato sono classificati come *albic podzol* i suoli *Miage 4*, *Miage 5*, *Miage 6* e *Miage 8*.

Sono generalmente caratterizzati da un pH inferiore a 6, da uno stoccaggio di C organico piuttosto elevato (fino a 4,18 kg/m^3) e da un'età maggiore rispetto ai *Regosols*.

Andando ad osservare il processo di podzolizzazione, si può denotare il fatto che, rispetto all'arco alpino, si è di fronte a tempistiche molto più ridotte (analogamente al caso-studio del Ghiacciaio del Lys, precedentemente citato) ed a velocità di comparsa di un orizzonte E maggiori, addirittura in suoli con età anche solo di poco inferiore ai 200 anni.

5. CONCLUSIONI

In questo elaborato sono caratterizzati i maggiori processi pedogenetici occorsi nell'area proglaciale del sito di studio.

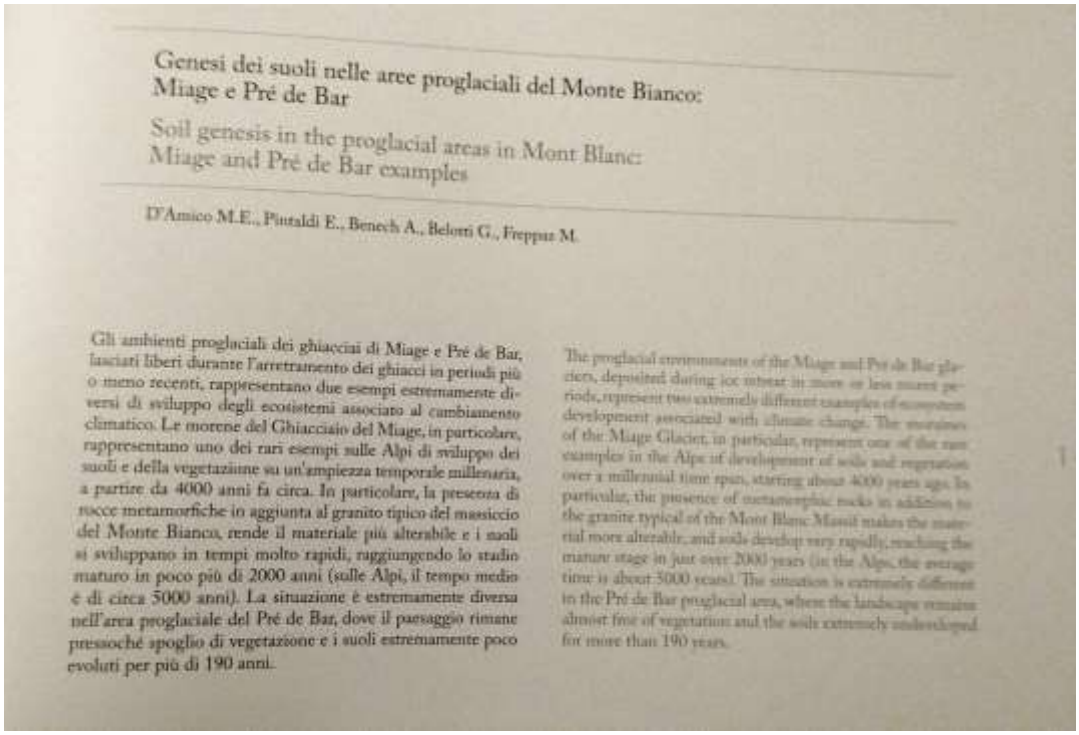
Sono stati osservati chiari segni di un'evoluzione pedologica molto più rapida della tendenza osservabile nell'arco alpino, con una differente caratterizzazione dei risultati in base alla collocazione geomorfologica e all'età dei vari siti.

Molte delle osservazioni fatte, come la velocità del processo di podzolizzazione e il contenuto di carbonio organico dei suoli più antichi, contribuiscono all'idea di un ambiente in rapida evoluzione, come possibile adattamento ad un mondo in altrettanto rapido cambiamento, lasciando spazio e possibilità a molteplici nuovi utilizzi e scopi per queste aree proglaciali, in modo da poterle valorizzare e tutelare nei modi più opportuni.

In quest'ottica, il presente elaborato e lo studio condotto sono presentati all'interno della mostra "*Adieu des Glaciers: Mont Blanc*", visitabile all'interno del Forte di Bard (AO). (Scheda in Appendice)

APPENDICE

Scheda della mostra "Adieu des Glaciers-Mont Blanc"



Genesi dei suoli nelle aree proglaciali del Monte Bianco: Miage e Pré de Bar

Soil genesis in the proglacial areas in Mont Blanc: Miage and Pré de Bar examples

D'Amico M.E., Pintaldi E., Beneck A., Belotti G., Freppaz M.

Gli ambienti proglaciali dei ghiacciai di Miage e Pré de Bar, lasciati liberi durante l'arretramento dei ghiacci in periodi più o meno recenti, rappresentano due esempi estremamente diversi di sviluppo degli ecosistemi associato al cambiamento climatico. Le morene del Ghiacciaio del Miage, in particolare, rappresentano uno dei rari esempi sulle Alpi di sviluppo dei suoli e della vegetazione su un'ampiezza temporale millenaria, a partire da 4000 anni fa circa. In particolare, la presenza di rocce metamorfiche in aggiunta al granito tipico del massiccio del Monte Bianco, rende il materiale più alterabile e i suoli si sviluppano in tempi molto rapidi, raggiungendo lo stadio maturo in poco più di 2000 anni (sulle Alpi, il tempo medio è di circa 5000 anni). La situazione è estremamente diversa nell'area proglaciale del Pré de Bar, dove il paesaggio rimane pressoché spoglio di vegetazione e i suoli estremamente poco evoluti per più di 190 anni.

The proglacial environments of the Miage and Pré de Bar glaciers, deposited during ice retreat in more or less recent periods, represent two extremely different examples of ecosystem development associated with climate change. The moraines of the Miage Glacier, in particular, represent one of the rare examples in the Alps of development of soils and vegetation over a millennial time span, starting about 4000 years ago. In particular, the presence of metamorphic rocks in addition to the granite typical of the Mont Blanc Massif makes the material more alterable, and soils develop very rapidly, reaching the mature stage in just over 2000 years (in the Alps, the average time is about 5000 years). The situation is extremely different in the Pré de Bar proglacial area, where the landscape remains almost free of vegetation and the soils extremely undeveloped for more than 190 years.

Il Ghiacciaio del Miage con le sue morene viste dal Mont Fortin.
Miage Glacier with its moraines seen from Mont Fortin.
(Foto/Photo M.E. D'Amico)

Profilo pedologico aperto su una morena più antica del Ghiacciaio del Miage.
Soil profile opened on an ancient moraine of Miage glacier.
(Foto/Photo M.E. D'Amico)

Conca proglaciale del ghiacciaio Pré de Bar.
The Pré de Bar proglacial area.
(Foto/Photo M.E. D'Amico)

Profilo pedologico aperto su una delle morene più recenti del Ghiacciaio del Miage.
Soil profile opened on a recent moraine of Miage Glacier.
(Foto/Photo M.E. D'Amico)

Profilo pedologico realizzato su giovani morene del Ghiacciaio Pré de Bar.
Soil profile opened on recent moraines of Pré de Bar Glacier.
(Foto/Photo M.E. D'Amico)

FIGURA 21-22-23: IMMAGINI TRATTE DAL LIBRO DELLA MOSTRA "ADIEU DES GLACIERS: MONT BLANC"

BIBLIOGRAFIA

Aeschlimann H. (1983). *Zur Gletschergeschichte des italienischen Mont Blanc Gebietes : Val Veny - Val Ferret* - Ruitor. Inaug. Diss., Univ. Zurich, 105 p.

Basile, A. et al. (2015). *"Analisi granulometrica".* Metodi di analisi chimica del suolo. A cura di C. Colombo e T. Miano, pp. 83–118

Bollati I., Smiraglia C., Pelfini M. (2013). *Assessment and Selection of Geomorphosites and Trails in the Miage Glacier Area (Western Italian Alps).* Environmental Management 51: 951-967

CREA (2023). *Soilsites* - Patrimonio culturale pedologico d'Italia.
https:// www.crea.gov.it/web/agricoltura-e-ambiente/-/soilsites-patrimonio-culturale-pedologico-italia.

Colombo, C. e T. Miano, cur. (2015). *Metodi di analisi chimica del suolo*

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - COMITATO GLACIOLOGICO ITALIANO (1961) - *Catasto dei ghiacciai italiani*. Vol. 2, Torino.

D'Amico, M. et al. (2008). *"Podzolization over ophiolitic materials in the western Alps (Natural Park of Mont Avic, Aosta Valley, Italy)"*. Geoderma 146.1, pp. 129–137.

D'Amico M.E., Freppaz M., Filippa G., Zanini E. (2014*). Vegetation influence on soil formation rate in a proglacial chronosequence (Lys Glacier, NW Italian Alps)*. Catena 113: 122-137

D'Amico, M. E., R. Gorra e M. Freppaz (2015). *"Small-scale variability of soil properties and soil–vegetation relationships in patterned ground on different lithologies (NW Italian Alps)".* Catena 135, pp. 47–58.

D'Amico, M. E. et al. (2020b). *"Soil types of Aosta Valley (NW-Italy)".* Journal of Maps 16.2, pp. 755–765.

Deline P. and Orombelli G. (2005). *Glacier fluctuations in the western Alps during the neoglacial, as indicated by the Miage morainic amphitheatre (Mont Blanc Massif, Italy).* Boreas 34: 456-467

Deline P. (1997). *Les variations holocènes récentes du glacier du Miage (Val Veny) : contribution à la prévision du risque glaciaire.* Mémoire DEA, Univ. Savoie, 57 p.

Deline P. (1999). *La mise en place de l'amphithéâtre morainique du Miage (Val Veny, Val d'Aoste). Géomorphologie,* sous presse.

Deline P. (2005) *Arrêt 2 -Amphithéâtre morainique du lac du Miage : reconstitution de la dynamique du glacier du Miage pendant l'Holocène*. Cahiers de géographie, numéro 3. *Le quaternaire des vallées alpines. Fronts glaciaires, mouvements de versants et comblements dans les vallées de l'Arve, d'Aoste et de Suse*. Livret-guide de l'excursion organisée par l'AFEQ du 2 au 4 juin 2005. pp. 63-71

Egli M., Wernli M., Kneisel C., Haeberli W. (2006). *Melting Glaciers and Soil Development in the Proglacial Area Morteratsch (Swiss Alps): I. Soil Type Chronosequence*. Arctic, Antarctic, and Alpine Reserarch 38: 499-509

Egli M., Dahms D., Norton K. (2014). *Soil formation rates on silicate parent material in alpine environments: Different approaches–different results?.* Geoderma 213: 320-333

Pelfini M., Diolaiuti G., Leonelli G., Bozzoni M. (2012). *The influence of Glacier surface processes on the short-term evolution of supraglacial tree vegetation: The case study of the Miage Glacier, Italian Alps*. The Holocene 22, 847-856.

FAO (2006). Guidelines for Soil Description. A cura di R. Jahn et al.

IUSS Working Group WRB (2022). *World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps*. 4a ed. Vienna, Austria: International Union of Soil Sciences (IUSS).

Kabala C., Zapart J. (2012). *Initial soil development and carbon accumulation on moraines of the rapidly retreating Werenskiold Glacier, SW Spitsbergen, Svalbard archipelago*. Geoderma 175-176: 9-20.

Leonelli G. and Pelfini M. (2013). *Past surface instability of Miage debris-covered glacier tongue (Mont Blanc Massif, Italy): a decadal-scale treering-based reconstruction*. Boreas 42, 613-622.

Mihalcea C., Brock B.W., Diolaiuti G., D'Agata C. (2008). *Using ASTER satellite and ground-based surface temperature measurements to derive supraglacial debris cover and thickness patterns on Miage Glacier (Mont Blanc Massif, Italy).* Cold Regions Science and Technology 52, Issue 3: 341-354.

Smiraglia C., G. Diolaiuti, D. Casati & M.P. Kirkbride. (2000*). Recent areal and altimetric variations of Miage Glacier (Monte Bianco massif, Italian Alps)*. " Debris Covered Glaciers", IAHS, Wallingford, 227-233.

RINGRAZIAMENTI

Dedico un ringraziamento *in primis* alla mia famiglia, al mio papà, alla mia mamma ed a Martina, Giorgia e Tommaso, che mi hanno sostenuto nel corso di questo percorso di studi, gioendo con me dei miei traguardi e sostenendomi nei momenti meno entusiastici.

Un ringraziamento al professor D'Amico, che mi ha seguito nel corso del tirocinio e della stesura di questo elaborato, rendendomi il lavoro molto più semplice ed aiutandomi nei momenti di difficoltà.

Un ringraziamento all'UniMont, ai professori e soprattutto a tutti coloro che, per tanto o poco tempo, sono passati nella mia vita, lasciando un qualche segno e rendendo questi anni ancora migliori.

Un grazie quindi a tutti gli amici, vicini e lontani, a chi ha sopportato i miei scleri pre-esame e a chi ha rischiato la vita con me trascinandomi in avventure poco ortodosse.

E infine un grazie a Edolo, a tutto quello che mi ha insegnato ed a quello che continuerà ad insegnarmi, un grazie a tutti coloro che vi ho incontrato ed un grazie alle sue montagne, che mi hanno reso forse un pochino più adulta, e, sicuramente, un poco più certa delle mie capacità.

Grazie