



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea in Scienze Forestali e Ambientali

Il ritiro dei Ghiacciai Alpini. Pedologia e biologia in riferimento al caso studio del ghiacciaio d'Agola.

Relatore
Augusto Zanella

Correlatori
Andrea Squartini, Valeria Lencioni

Laureando
Carollo Silvio
Matricola n. 2023584

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Sommario

Riassunto	4
Abstract	5
1. Introduzione	6
1.1 Progetto Biomiti	8
2. Descrizione area di studio	9
2.1 Gruppo Adamello-Presanella	9
2.2 Dolomiti di Brenta	10
2.2.1 Catena d'Ambiez	12
2.3 I ghiacciai	13
2.3.1 Ghiacciaio di Prato Fiorito	16
2.3.2 Ghiacciaio d'Agola	17
2.4 Il suolo	18
2.4.1 Classificazione del suolo	21
3. Strumenti e metodi	22
3.1 Indagine microbiologica	22
3.1.1 Estrazione DNA	23
3.2 Indagine pedologica	24
3.3 Campionamento microbiologico e rilevamento pedologico	25
3.3.1 Settore Agola	25
3.3.2 Settore Pratofiorito	25
4. Dati e risultati	27
4.1 Batteri e Archea	29
4.2 Funghi	39
4.3 Humipedon	48
5. Discussione	60
6. Conclusioni	66
7. Bibliografia e sitografia	69

Riassunto

Il bioma ghiacciaio è caratterizzato da habitat estremi, dove variazioni climatiche anche minime possono avere conseguenze molto importanti sugli ecosistemi e sugli organismi che li abitano. Da un punto di vista ecologico, i ghiacciai in ritiro rappresentano laboratori in pieno campo unici per apprendere lo sviluppo e le dinamiche degli ecosistemi primari. Con questo studio preliminare abbiamo indagato le condizioni pedologiche e biologiche che caratterizzano il fenomeno di ritiro dei ghiacci e la formazione del suolo nel gruppo dolomitico del Brenta ed in particolare nel sottogruppo della Catena d'Ambiez. Abbiamo indagato, tramite raccolta di campioni e sequenziamento genetico, il microbioma del suolo glaciale in diversi contesti ecologici. Dalle analisi condotte il fattore trainante nel plasmare ricche, variegata ed equilibrate comunità batteriche nel suolo, sembra essere la presenza di vegetazione. A governare le dinamiche ecosistemiche all'interno delle comunità fungine, parrebbe invece essere un ridotto numero di specie, similmente a quanto accade per i batteri in suoli non vegetati. La formazione del suolo su ghiaione si manifesta in un primo tempo come un humipedon indifferenziato; poi compare un orizzonte organo-minerale; ed infine su questo si genera un orizzonte olorganico. Risultanti della simbiosi pianta batterio, i grumi organo-minerali dell'orizzonte A sono più visibili nella rizosfera. In un nuovo sistema di humus denominato "Litho," sono state inserite alcune forme di humus legate alla dinamica di fusione della neve e alla colonizzazione del detrito da parte delle piante. Sono state inoltre descritte altre forme di humus presenti sul manto nevoso del ghiacciaio, comprese in un altro sistema di humus denominato "Niveo".

Abstract

The glacier biome is characterized by extreme habitats, where even minimal climatic variations can have very important consequences on ecosystems and the organisms that inhabit them. From an ecological point of view, retreating glaciers represent unique open-field laboratories for learning the development and dynamics of primary ecosystems. With this preliminary study we investigated the pedological and biological conditions that characterize the phenomenon of ice retreat and the formation of the soil in the Brenta dolomitic group and in particular in the subgroup of the Ambiez chain. We investigated the glacial soil microbiome in different ecological contexts through sample collection and genetic sequencing. From the analyzes conducted, the driving factor in shaping rich, varied and balanced bacterial communities in the soil appears to be the presence of vegetation. Instead, a small number of species seems to govern ecosystem dynamics within fungal communities, similarly to what happens for bacteria in non-vegetated soils. The formation of the soil on scree initially manifests itself as an undifferentiated humipedon; then an organo-mineral horizon appears; and finally on this an holorganic horizon is generated. Resulting from the plant bacterium symbiosis, the organo-mineral aggregates of A horizon are most visible in the rhizosphere. In a new humus system called "Litho," some humus forms related to the dynamics of snow melting and colonization of debris by plants have been inserted. Other humus forms present on the snow cover of the glacier have also been described, including in another humus system called "Niveo".

1. Introduzione

Da un punto di vista biologico, la Terra è un pianeta freddo. La maggior parte della superficie terrestre è coperta da oceani dove le temperature sono inferiori a 5°C (Russell NJ., 1990). Altri esempi di questi ambienti freddi sono l'alta atmosfera, le zone marine bentoniche, i deserti polari, i ghiacciai, i laghi subglaciali e i mari ghiacciati (Doyle S. et al., 2012). Circa il 10% della superficie terrestre del pianeta è coperta da ghiaccio sotto forma di calotte glaciali o ghiacciai, accumulando il 75% dell'acqua dolce del mondo (GLIMS, 2012). Gli ambienti freddi della Terra sono stati considerati per molto tempo disabitati. I deserti ghiacciati sembravano troppo ostili per ospitare la vita. Tuttavia, i ghiacciai e le calotte glaciali sono biomi unici dominati da comunità microbiche che mantengono rotte biochimiche attive. I ghiacciai sono dominati da caratteristiche ambientali molto specifiche come le basse temperature associate alle precipitazioni sotto forma di neve, l'esposizione al vento intenso e l'irraggiamento solare estremo. In estate si verificano processi di fusione e sublimazione che si contrappongono all'accumulo di ghiaccio in inverno, producendo un dinamismo impercettibile ma costante. Questa è la base della vita di molti degli ecosistemi che li abitano. I ghiacciai sono quindi veri e propri biomi dove vive una grande diversità di microrganismi appartenenti ai tre domini principali (Batteri, Eucarya e Archaea).

Una nuova fase della storia è però iniziata. Quasi metà della terra e dell'atmosfera terrestre sono state trasformate dall'attività umana durante la "Grande Accelerazione", con impatti significativi sulla biodiversità e sugli ecosistemi. Siamo entrati a pieno titolo nel gruppo dei meteoriti e dei mega-vulcani che hanno trasformato la terra milioni di anni fa. Siamo entrati in una nuova epoca geologica dominata dall'uomo chiamata Antropocene. Anche se la terra è in continuo cambiamento, l'attuale velocità di cambiamento è problematica e senza precedenti (Aasish Janardhanan, 2019). Il Cambiamento climatico ha alterato gli ecosistemi marini, terrestri e d'acqua dolce in tutto il mondo. Gli effetti sono stati sperimentati prima e più diffusamente del previsto. Risposte biologiche, inclusi cambiamenti nella fisiologia, crescita, abbondanza, collocazione geografica e fenologia spesso non sono sufficienti per far fronte al recente cambiamento climatico che sta causando

perdite di specie locali, aumento delle malattie ed eventi di mortalità di massa di piante e animali, risultando essere la prima ragione di estinzioni, ristrutturazione degli ecosistemi e declino dei servizi ecosistemici chiave. Il cambiamento climatico antropogenico ha esposto gli ecosistemi a condizioni che non hanno precedenti nel corso dei millenni e che hanno avuto un forte impatto sulle specie della terraferma e dell'oceano (IPCC_AR6, 2021). Le drammatiche evidenze nelle zone d'alta quota, in particolare nelle Alpi, danno una chiara definizione del cambiamento climatico e dei suoi impatti. La riduzione del manto nevoso alle quote più basse, il ritiro dei ghiacciai, la fusione del permafrost, l'estrema variazione di temperatura e le precipitazioni sono i modi in cui le Alpi sperimentano l'impatto. I ghiacciai delle Alpi sono indicatori altamente sensibili dei cambiamenti climatici passati e presenti. La loro area e il loro volume attuali sono una risposta ai cambiamenti sia della temperatura che delle precipitazioni, poiché i ghiacciai rispondono a lievi ma prolungate variazioni del regime climatico. Il rapido ritiro dei ghiacci sulle Alpi espone il sub-strato roccioso a nuove condizioni ambientali. La colonizzazione di un'area recentemente deglaciata implica variazioni di specie e della loro abbondanza e distribuzione. L'ecologia microbica può pertanto essere uno strumento utile per monitorare il cambiamento biologico che avviene nei ghiacciai in ritirata (Eva Garcia-Lopez e Cristina Cid, 2017). Attraverso il progetto Biomiti, alcuni ricercatori, tra cui il prof. Andrea Squartini, docente presso il dipartimento DAFNAE dell'Università di Padova, e la dott.ssa Valeria Lencioni, coordinatrice dell'Ambito Clima ed Ecologia nell'Ufficio Ricerca e Collezioni museali presso il MUSE, si sono interessati dello studio dei microrganismi nelle aree periglaciali delle Dolomiti di Brenta. Il loro lavoro ha fornito dati e competenze per il presente studio, il quale si è, da una parte occupato dell'indagine microbiologica, e dall'altra di un'indagine pedologica. La genesi del suolo è infatti strettamente connessa all'attività metabolica dei microrganismi e l'humipedon, la parte più superficiale, fatta di orizzonti organici e organo-minerali, ne è, tanto più in questi ambienti, diretta espressione. In questa sezione di suolo avvengono i principali processi di interazione tra suolo e piante, che, come già detto, sono, insieme ai microrganismi, fattori decisivi della pedogenesi. Lo studio dei suoli glaciali, di cui il presente lavoro contiene un resoconto, è stato condotto dal prof. Augusto Zanella, docente presso il dipartimento TESAF dell'Università di Padova.

1.1 Progetto Biomiti

Nel 2018, dopo una attenta fase di pianificazione, Il Parco Naturale Adamello Brenta ha dato avvio ad un ampio progetto di ricerca che si propone di approfondire le conoscenze sulle caratteristiche ambientali delle Dolomiti di Brenta, in un'area collocata nella fascia altitudinale alto-alpina, tra i 1900 e i 2900 m s.l.m., dove gli effetti dei cambiamenti climatici potrebbero essere più evidenti.

Il progetto denominato “Biomiti – *Alla ricerca della vita sulle Dolomiti di Brenta*” è promosso dal Parco Naturale Adamello Brenta, in stretta collaborazione con il Dipartimento di Medicina Veterinaria dell'Università degli Studi di Sassari e la Sezione di Zoologia degli Invertebrati e Idrobiologia del MUSE.

Biomiti si è sviluppato in una serie di approfondimenti faunistici, floristici, climatici e geomorfologici, nel tentativo di cogliere le relazioni ecosistemiche. Caratteristica fondamentale di Biomiti è quindi quella di essere basato su un approccio olistico nei confronti dell'ambiente, raccogliendo l'esigenza di una comunità scientifica sempre più consapevole che per interpretare alcune dinamiche in atto, come gli effetti sugli ecosistemi causati dai cambiamenti climatici, è necessario un lavoro collegiale di diversi specialisti di settore. Biomiti come momento di confronto costruttivo, un brain storming sull'ambiente capace di evidenziare i nostri limiti conosciuti, prima ancora della conoscenza degli ecosistemi.

Nell'immediato e in modo concreto, il progetto però ha già portato a dei risultati importanti, primo tra tutti il fatto che sono state effettuate nitide “istantanee” delle diverse componenti ambientali indagate, utili anche a “chi verrà dopo di noi”.

In prospettiva si dovrà focalizzare l'attenzione sull'analisi dei parametri micro-climatici e ambientali capaci di condizionare la distribuzione/abbondanza dei diversi taxa, mettendo in evidenza le situazioni più vulnerabili, anche in termini di tipologie e “zone rifugio”.

2. Descrizione area di studio

Il Parco Naturale Adamello Brenta è un'area protetta istituita nel 1967 che presenta una estensione di 620 km² e rappresenta la più vasta area protetta del Trentino.

Si estende nel Trentino occidentale tra la Val di Non, le Giudicarie e la Val di Sole, comprendendo i gruppi montuosi dell'Adamello-Presanella e delle Dolomiti di Brenta, divisi nettamente dalla Val Rendena. I due sistemi montuosi sono collegati all'altezza del Passo Campo Carlo Magno, tramite un'area del Parco, che funge da corridoio ecologico e da connessione per garantire la continuità del Parco stesso.

2.1 Gruppo Adamello-Presanella

Figura 1. Veduta sul Carè Alto, Corno di Cavento, Crozzon di Larès



Caratteristiche generali

Le vette del gruppo hanno avuto in gran parte origine da un magma che fra 30 e 45 milioni di anni fa si consolidò al di sotto della superficie terrestre. Il raffreddamento avvenne molto lentamente, dando luogo a una roccia ben cristallizzata, simile al granito, ma in composizione chimica diversa, che prende il nome di tonalite.

2.2 Dolomiti di Brenta



Figura 2. Veduta sulle Dolomiti di Brenta.

Caratteristiche generali

Fra i gruppi montuosi a carattere dolomitico, il Gruppo di Brenta appare particolarmente grandioso e severo. Le sue architetture ardite e poderose dominano il paesaggio e ne rendono tipica la bellezza. Le cime maggiori si elevano tra i 2800 e i 3000 m s.l.m.; la cima Tosa raggiunge 3173 m s.l.m. ed è il punto culminante del gruppo. L'ambiente è caratterizzato dalla presenza di ghiacciai, di superficie ridotta, e di numerosi canali intasati di neve fino a estate inoltrata e in seguito spesso con ghiaccio affiorante. Orograficamente il gruppo è disposto in direzione nord-sud per circa 42 km e si stende su una superficie di circa 400 km². La catena principale è divisa in due parti dall'incisione della Bocca di Brenta. A nord di questa sorgono dapprima la Catena degli Sfulmini, con la Brenta Alta, poi il Massiccio del Grostè e la Catena Settentrionale. A sud e a ovest della Bocca di Brenta si ergono il Massiccio della Tosa, e la Catena d'Ambiez (G. Buscaini, E. Castiglioni, 1949).

Geologia

Per la sua posizione a ovest dell'Adige, il Gruppo di Brenta rimane compreso dal punto di vista geografico ancora nelle Alpi Retiche; tuttavia, le sue rocce in prevalenza sedimentarie lo differenziano decisamente dai massicci cristallini delle Alpi Centrali, avvicinandolo anche nell'aspetto alle montagne dolomitiche e meritandogli il nome in uso di Dolomiti di Brenta. Le rocce più diffuse sono dolomie compatte in grossi banchi (Dolomia Principale del Norico; età 205 MA). In queste dolomie sono scolpiti il Campanile Basso, il Crozzon e quasi tutte le vette principali fra la Cima Tosa e il massiccio del Grostè. Molte cime dei sottogruppi marginali, come per esempio le cime di Pratofiorito, sono invece costituite di calcari massicci, che vengono attribuiti agli intervalli cronologici più recenti (G. Buscaini, E. Castiglioni, 1949).

Geomorfologia

Le forme delle cime e delle valli sono condizionate dalla litologia e dall'assetto tettonico della regione, ma il loro modellamento è dovuto all'opera degli agenti meteorici, dei fiumi e dei ghiacciai. La diversità litologica si riflette anche nelle falde detritiche alla base delle pareti, i cosiddetti "ghiaioni": a blocchi grossolani quelli della Dolomia Principale, a fasce regolari di detrito più minuto quelle dei calcari. Al detrito di falda si sovrappongono grandi masse franate. Dove predomina il calcare si sono formate diverse depressioni doliniformi, denominate "pozze", come la pozza Tramontana. Sembra trattarsi di fenomeni di carsificazione, dovuti alla solubilità del calcare per azione delle acque meteoriche (G. Buscaini, E. Castiglioni, 1949).

Glacialismo

Il ritrovamento di massi erratici a quote di quasi 2700 m s.l.m., come al passo di Val Gelada, fa supporre che durante le epoche glaciali emergessero dalle calotte di ghiaccio solo le vette più elevate del gruppo. L'azione erosiva delle colate si è poi esplicata nel modellamento delle valli che hanno assunto il caratteristico profilo trasversale a U. Attualmente l'estensione dei ghiacciai, qui denominati "vedrette", è molto ridotta. Anche la maggior parte degli alti circhi glaciali, per cui è ricorrente il toponimo di "buse", racchiude solo ancora nevai. Sono invece numerose le morene stadiali, serbanti spesso intatta la forma del cordone e dell'arco. Caratteristici del gruppo sono gli ammassi caotici dovuti a franamenti verificatesi in seguito al ritiro dei ghiacciai, e che in parte subirono ancora il trasporto glaciale. Queste frane morenizzate vengono denominate "marocche" (G. Buscaini, E. Castiglioni, 1949).

2.2.1 Catena d'Ambiez

L'area interessata dallo studio può essere inquadrata più precisamente all'interno del sottogruppo della Catena d'Ambiez. Questa catena si stacca alla Bocca d'Ambiez dal massiccio della Tosa e si sviluppa quasi rettilinea verso sud per circa 12 km. La catena s'inizia a nord con la bella Cima d'Ambiez, la più alta e la più cospicua di tutto il sottogruppo meridionale; seguono nell'ordine la Cima Bassa d'Ambiez, la cima d'Agola, la Cima Susat, la Cima di Pratofiorito, le Tose e il Cimon di Cresole, che formano sul lato d'Ambiez una ininterrotta bastionata di pareti rocciose, compatte e assai levigate, mentre sull'opposto versante (XII Apostoli e Vallon) hanno in parte forme più benigne e sono intervallate da piccole vedrette e campi di neve, che si spingono in alto fino alle insellature di cresta. La ricerca si è concentrata in particolare su due settori appartenenti a questo sottogruppo, entrambi incisi e modellati dalla presenza di un ghiacciaio, ormai ridotto a poca cosa. Si tratta della vedretta di Vallagola, sulla quale troneggia la magnifica Cima d'Ambiez e della vedretta di Pratofiorito, separata dalla precedente dalla Cima d'Agola e dal suo contrafforte che protende verso la Val Nardis e che termina con la Cima Bassa d'Agola. In questa area prevale il calcare rispetto alla dolomia e il detrito lambito dalle esili vedrette è

per lo più di modeste dimensioni.

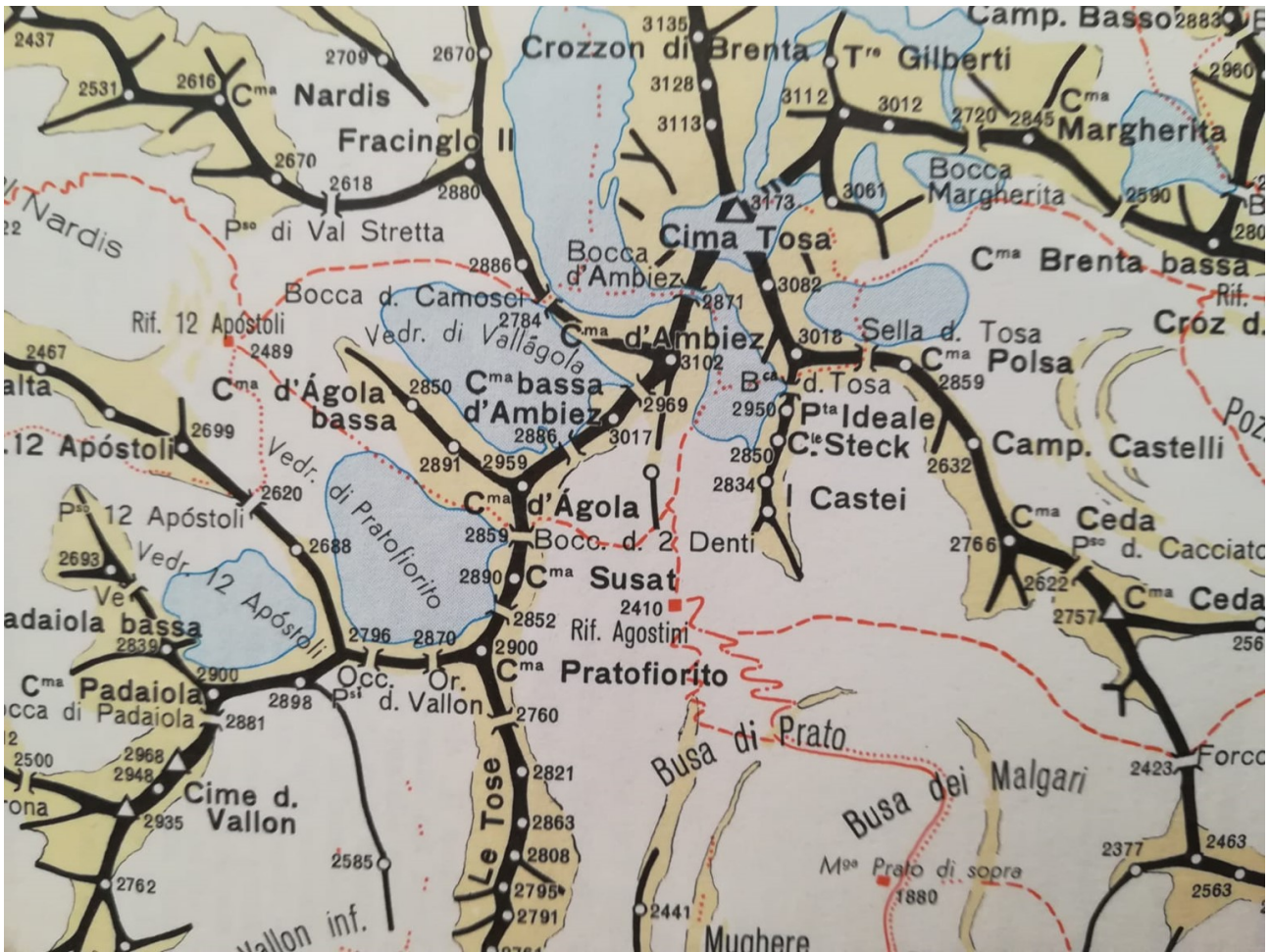


Figura 3. Val d'Ambiez. Da "guida dei monti d'Italia" G. Buscaini - E. Castiglioni

2.3 I ghiacciai

Il ghiacciaio è una massa di ghiaccio che si conserva per molti anni, da decine a migliaia. Si tratta di un sistema naturale che deriva dalla trasformazione della neve e che scambia materia ed energia con l'ambiente circostante. La neve si trasforma in ghiaccio attraverso processi di compattazione, fusione e sublimazione e ricongelamento, raggiungendo densità di 800-900 kg/m³. Nei ghiacciai alpini questo processo richiede da 3 a 5 anni. In un ghiacciaio possiamo distinguere una zona di alimentazione, dove l'accumulo prevale sull'ablazione e una zona di ablazione, dove fusione e sublimazione prevalgono sull'accumulo. La linea di equilibrio separa queste

due zone e può avanzare o retrocedere a seconda dell'andamento stagionale.

I ghiacciai delle Alpi a fine anni '80 erano 5000 per una superficie complessiva di 2900 km² e un volume di 130 km³. Il nostro Paese conta secondo l'ultimo Catasto effettuato ben 903 ghiacciai sul suo territorio. Si trovano praticamente tutti sull'arco alpino, tranne i due piccoli corpi glaciali del Calderone sull'Appennino abruzzese. In totale coprono una superficie di 368 km², ovvero il 40% in meno rispetto al precedente catasto del 1989. Il confronto con i dati raccolti nei decenni passati permette di certificare come i ghiacciai italiani siano in forte ritiro.

L'ultimo catasto realizzato dimostra che la superficie è passata dai 609 del 1989 (catasto World Glacier Inventory, con dati raccolti negli anni '70-80), agli attuali 368 chilometri, pari al 40% in meno rispetto all'ultimo catasto. Il numero dei ghiacciai è paradossalmente aumentato: si è passati dai 835 apparati glaciali del primo catasto (realizzato nel 1962) ai 903 attuali. L'incremento di 68 unità però è dovuto alle frammentazioni, ovvero a ghiacciai più grandi che per via della loro fusione si sono ridotti in più corpi sempre più piccoli (Seppi R., 2008).

Il Parco Naturale Adamello Brenta comprende oggi la maggior superficie glaciale del Trentino, contando 41 ghiacciai sul proprio territorio. Nel Gruppo di Brenta ci sono 17 piccoli ghiacciai. Rispetto a quarant'anni fa sono scomparse varie lingue glaciali e la superficie complessiva dei ghiacci è diminuita di almeno un terzo. Sulla Presanella, che accoglie 7 ghiacciai, il regresso è stato meno consistente, al pari dell'Adamello trentino, che ne comprende 17. I ghiacciai del Parco sono l'estremo residuo di quella colossale massa di ghiaccio che, tra 18.000 e 20.000 anni fa, ricopriva tutte le Alpi. In quel tempo solo le cime dei monti più alti emergevano dalla calotta glaciale il cui spessore si aggirava attorno ai 2000m in corrispondenza della media Val d'Adige e ai 1000m nella zona del Garda. La fase del ritiro, conseguente al miglioramento climatico, iniziò con decisione circa 15.000 anni fa e continuò fino al 6.000 a.C. (periodo "tardiglaciale"), ma fu interrotta da vari momenti di inasprimento del clima che condussero a temporanee espansioni dei ghiacciai. Al "tardiglaciale" seguì un periodo mite, detto "postglaciale", che durò fino al 2500 a.C. Circa. Durante l'Età del bronzo vi fu un nuovo periodo freddo, seguito da una lunga parentesi calda che si protrasse fino al 1600 d.C. e che fece ritirare le vedrette a quote molto più alte delle attuali, rendendo quindi libere dal gelo anche zone oggi occupate dai ghiacciai. Tra

il 1550 e il 1850, nella cosiddetta “Piccola età glaciale”, i ghiacciai attraversarono una nuova fase di decisa espansione. Poi iniziò il regresso, tuttavia irregolare, che è ancora in corso e che ha portato ad un deciso arretramento delle lingue glaciali.

Il ritiro dei ghiacciai

Tra la fine del XIX e l’inizio del XXI secolo, nelle Alpi la temperatura media dell’aria è aumentata di circa 2 °C, un aumento più che doppio rispetto a quello osservato nell’intero emisfero settentrionale, pari a 0,8 °C. Nello stesso periodo, le precipitazioni hanno evidenziato una tendenza all’incremento nella parte settentrionale delle Alpi, ed una diminuzione nel settore meridionale. Dalla fine della Piccola Età Glaciale (1850 circa), nelle Alpi si è assistito ad un generale ritiro dei ghiacciai, interrotto da due fasi di breve avanzata negli anni ‘20 e negli anni ‘70 del secolo scorso. Nel complesso, si è stimato che dal 1850 ad oggi le aree glaciali nelle Alpi si siano ridotte di circa la metà. A partire dagli anni ‘80 del secolo scorso il tasso di riduzione ha subito una accelerazione. I ghiacciai italiani non fanno eccezione e, data la loro posizione geografica, la tendenza al regresso è più pronunciata rispetto ai ghiacciai posti nella parte settentrionale delle Alpi (Nigrelli G, et al., 2015). Nel Pleistocene (1,8 milioni - 14.000 anni fa) i grandi ghiacciai alpini si spingevano fino al nord della Pianura Padana. La storia recente dei ghiacciai è invece ben diversa e si ipotizza che già entro la fine di questo secolo la maggior parte dei ghiacciai alpini sarà quasi interamente scomparsa (F. Spinedi e G. Kappenberger, 2017). Il rialzo globale della temperatura, iniziato dopo la metà del XVIII secolo, alla fine della Piccola Età Glaciale, ha subito un’impennata a partire dalla metà degli anni Ottanta ed è responsabile del recente ritiro e della vistosa diminuzione del volume dei ghiacciai, sia a livello mondiale sia alpino. Particolarmente preoccupante è il ritiro dei ghiacciai, in quanto rappresenta un pericolo per le comunità umane che vivono nelle loro vicinanze come esplosioni, smottamenti, colate detritiche e valanghe detritiche. Inoltre, i ghiacciai contribuiscono in modo sostanziale alle risorse idriche, che possono essere notevolmente ridotte in molte aree del mondo.

2.3.1 Ghiacciaio di Prato Fiorito

La superficie del Ghiacciaio di Prà Fiori, esposto a settentrione e posto sotto Cima Parto Fiorito (2903 m) nella porzione meridionale delle Dolomiti di Brenta, si è ridotta di circa 3 Ha dal 1990 al 1999, passando da 11 a 8. Gli ultimi rilevamenti del 2011 riportano un'area di estensione di 0,04 km². (Archivio punti d'interesse "POI", sito ufficiale Parco Naturale Adamello Brenta)



Figura 4. Ghiacciaio di Prato Fiorito e cima omonima.

2.3.2 Ghiacciaio d'Agola

Il ghiacciaio d'Agola è il più esteso del Brenta (0,19 km²) ed è soggetto ad una fase di rapido ritiro. Occupa un circo a prevalente esposizione NW. È un ghiacciaio ad alimentazione mista, da neve diretta e da valanghe, che si dipartono dalle pareti verticali delle cime che ombreggiano i settori di testata. Il ghiacciaio d'Agola è un piccolo ghiacciaio rappresentativo della tipologia dei ghiacciai presenti nel Gruppo di Brenta. Particolarmente spettacolari e significative sono le morfologie glaciali di erosione e accumulo che caratterizzano i dintorni del ghiacciaio.

Ad esempio, le morene laterali della piccola età glaciale. Nonostante l'intensa fusione glaciale, si nota l'assenza di un torrente proglaciale. Questo scende immediatamente nel sistema di circolazione carsica delle acque che caratterizza il Gruppo di Brenta. Il ghiacciaio d'Agola negli ultimi 20 anni ha subito una perdita di spessore di 13 metri di ghiacciaio e la fronte si è ritirata di 80 metri. Nel corso del 2005 un'indagine con georadar ne ha misurato lo spessore che è risultato essere mediamente di 23 metri. Con l'attuale condizione climatica, che vede la perdita di 2 metri di ghiaccio ogni anno, il Ghiacciaio d'Agola potrebbe estinguersi in una quindicina d'anni (Archivio punti d'interesse "POI", sito ufficiale Parco Naturale Adamello Brenta).



Figura 5. Ghiacciaio d'Agola e cima d'Ambiez.

2.4 Il suolo

I suoli alle alte latitudini e altitudini si sviluppano su scale temporali relativamente lunghe, a causa delle basse temperature medie annuali e dei lenti tassi di erosione. I principali processi che influenzano la pedogenesi attivi sopra il limite della vegetazione forestale sono la crioturbazione e l'erosione, mentre l'acidificazione causata dalla copertura vegetale è intensa solo in località stabili e a bassa pendenza. Analogamente a quanto osservato da Sirois & Grandtner (1991), i movimenti periglaciali, la forte erosione e deposizione tipiche dei versanti crioturbati e la (prevalentemente) bassa copertura vegetale inibiscono lo sviluppo dei suoli, che sono classificati come Regosols, Cambisols o Cryosol (D'Amico et al., 2009).

La roccia, che costituisce il detrito presente nel circo glaciale, subisce un lento ma costante processo di degradazione fisica e chimica che unitamente all'attività biologica di microrganismi come funghi e batteri che la abitano, porta lentamente alla genesi di un suolo grezzo, primitivo. Come in ogni altro tipo di attività pedogena, dal momento della deposizione di un sedimento o dell'esposizione di un materiale iniziano a verificarsi sottili cambiamenti. Questi sistemi prossimi al ghiacciaio hanno un elevato rapporto roccia/acqua, che genera elevate quantità di prodotti di alterazione e nutrienti. L'erosione e la disgregazione fisica possono avvenire in modo abiotico attraverso la comminazione glaciale del substrato roccioso. Queste condizioni, in combinazione con la mancanza di luce e il potenziale redox che varia da habitat ben ossigenati a completamente anossici, forniscono le condizioni ideali per lo sviluppo di un consorzio di microbi eterotrofi e chemoautotrofi adattati al freddo che possono fornire ulteriori reazioni per accelerare l'erosione delle rocce sotto il ghiaccio. È presumibile quindi l'esistenza di minerali primari, presenti nel suolo come eredità dei costituenti mineralogici della roccia madre attraverso processi di semplice disgregazione fisica e minerali secondari derivanti da trasformazioni chimiche e fisiche a carico dei minerali primari come i minerali argillosi. I minerali argillosi sono tra i componenti essenziali della fase solida del suolo e la loro composizione e il relativo contenuto possono influenzare molte proprietà fisiche e chimiche e lo stato nutritivo del suolo. La composizione e il contenuto relativo dei minerali argillosi

dipendono dal materiale originario, dal clima e dalla microtopografia. Le rocce carbonatiche e dolomitiche sedimentarie sono composte principalmente da calcite e dolomite e contengono spesso penetrazioni miste (sabbia, argilla e silice). Il contenuto relativo di minerali argillosi varia tra i suoli montani derivati da diversi materiali madre. Nel caso di rocce sedimentarie carbonatiche e dolomitiche il contenuto di caolinite è generalmente più alto rispetto al contenuto di minerali argillosi 2:1 come illite e vermiculite (Lorenzoni, 1992). Prendendo in esame la componente organica è necessario considerare i tassi, non banali, di produzione e trasformazione della materia organica sui ghiacciai. Alcuni studi parlano di 7 mg di carbonio organico per grammo di materiale di crioconite (Musilova et al., 2016). Il flusso di carbonio organico disciolto dai ghiacciai non è quindi trascurabile. Inoltre se si tiene conto del potenziale aumento della produzione di carbonio organico sulla superficie del ghiaccio dovuto all'aumento dell'attività microbica, legata alla maggior presenza di acqua libera, unitamente, alla capacità dei microrganismi presenti nel detrito roccioso, di rilasciare composti nell'ambiente sotto forma di sostanze polimeriche extracellulari, che a loro volta includono proteine, lipidi, polisaccaridi e altri metaboliti secondari, comprendiamo come i microbiomi del detrito e del ghiacciaio siano indispensabile per la genesi del suolo, inteso come complesso "merobiotico". Quanto detto finora delinea condizioni pedologiche estremamente primitive: suolo inteso come detrito roccioso a diversi stadi di trasformazione unitamente ad una variegata comunità di microrganismi e i prodotti della sua attività biologica. A questo sintetico quadro potremmo aggiungere il materiale esogeno organico e non, che giunge attraverso precipitazioni, deiezioni di animali (soprattutto uccelli) e deposizione secca, come particelle minerali (es. sabbia) e materiale organico portati dal vento. Tra queste entità organiche troviamo anche i semi delle spermatofite. Tuttavia, la povertà dei suoli, la natura incoerente di ghiaioni e macereti, le acclività spesso estreme e il clima severo non consentono alla maggioranza delle piante, dando per scontata la germinazione, di fissare le loro radici e prosperare in questo ambiente. Ciononostante vi sono alcune specie che presentano alcune caratteristiche atte a consentire la sopravvivenza in una situazione per molti versi sfavorevole alla vita vegetale. Per queste entità così specializzate è stata coniata un'apposita denominazione: nella letteratura geobotanica esse vengono infatti

denominate come glareofite o piante glareicole. Mentre le rupi ospitano organismi vegetali appartenenti a gruppi sistematici diversi, tra i detriti possono vivere soltanto piante capaci di ancorarsi al substrato mobile attraverso un apparato radicale specificamente adattato. Ciò esclude alghe, licheni e muschi, in quanto del tutto sprovvisti di vere radici. Licheni e muschi epilitici si rinvengono, peraltro, sui clasti più antichi e stabili, mentre briofite terricole possono crescere sul materiale fine che si forma sul fondo delle anfrattuosità tra i massi di maggiori dimensioni alla base del pendio detritico. L'apparato radicale rizomatoso robusto e allungato costituisce quindi un elemento fondamentale per garantire la vita delle glareofite, ma rappresenta un fattore determinante anche per lo sviluppo del suolo. La rizodeposizione e il turnover di biomassa radicale sono infatti un apporto primario di materiale organico. Tenendo conto che la produzione radicale costituisce dal 40 all'85% della produzione primaria netta (P.P.N.) di una fitocenosi (Gobat et al., 1998) e la rizodeposizione dal 20 al 50 % si riesce ad intuire la rilevanza della presenza di vegetali nel processo di formazione del suolo. Composti organici solubili e ormoni (essudati), sostanze gelatinose di natura polisaccaridica, secrete specialmente dalla cuffia, sostanze derivanti dalla rottura delle cellule e cellule stesse distaccatesi dalle radici in crescita riforniscono il microbioma eterotrofo del suolo che unitamente ai composti rilasciati dagli altri produttori primari permettono la formazione di piccoli aggregati. I composti organici prodotti dal metabolismo di batteri e funghi fungono infatti da "legante" promuovendo la bioflocculazione, aggregando insieme particelle inorganiche, microrganismi viventi a altra materia organica. In seguito a questo processo si forma una struttura di tipo microgrumoso, con aggregati di piccole dimensioni più o meno ricchi di sostanza organica.

2.4.1 Classificazione del suolo

È chiaro che la formula di origine del suolo non è facilmente risolvibile da una prospettiva matematica, ma i fattori di formazione del suolo forniscono una solida struttura per il nostro pensiero. Il suolo è un'entità complessa e dunque difficile da classificare. Nella tassonomia del suolo, gli ordini pedologici si distinguono principalmente in base alla presenza o assenza di uno o più orizzonti diagnostici nel profilo pedologico. Pertanto; mentre le proprietà del suolo sono enfatizzate nella descrizione sistematica degli ordini del suolo, la loro natura genetica è rivelata solo indirettamente attraverso gli orizzonti diagnostici. In alcuni sistemi di classificazione viene data rilevante enfasi ai regimi di temperatura e umidità del suolo e tipologia di materiale di partenza e al loro ruolo nei processi di formazione del suolo. Potremmo quindi dire che un buon approccio di valutazione, definizione e identificazione del suolo dovrebbe tenere conto di caratteristiche quantitative come spessore degli orizzonti, presenza di grumi ecc., ma anche di parametri fattoriali-genetici (regimi climatici). L'approccio morfogenetico e quindi l'identificazione di orizzonti diagnostici permettono di risalire ai processi di pedogenesi tramite l'osservazione di caratteristiche che rappresentano, nel loro insieme, un'istantanea del complesso e dinamico processo di formazione del suolo. Valutare anche le condizioni fattoriali o per così dire genetiche come clima e natura del materiale di partenza, essendo tra i principali parametri che governano la pedogenesi, aiuta a meglio inquadrare e contestualizzare l'analisi morfologica. Alcune caratteristiche non sono sempre riconoscibili e i processi di genesi non possono quindi essere dedotti se non tramite l'indagine di fattori genetici.

3. Strumenti e metodi

3.1 Indagine microbiologica

Al fine di indagare le diverse condizioni biologiche presenti in prossimità del ghiacciaio sono stati raccolti e studiati alcuni campioni di terreno all'interno del circo glaciale a diverse distanze dalla zona di capolinea del ghiacciaio. Sono stati identificati due siti principali nel settore d'Agola e un altro nel settore di Pratofiorito. La principale variabile ambientale considerata nella scelta dei siti ha riguardato la distanza dal fronte del ghiacciaio e conseguentemente la quota; mentre a livello di sito è stata data importanza alle diverse condizioni ecologiche: profondità della buca, presenza-assenza di vegetazione.

Una volta individuati i siti sono state aperte delle buche di profondità variabile tra i 10 e i 50 cm che hanno permesso la raccolta di alcuni campioni di suolo per la successiva analisi biologica di laboratorio, che ha previsto l'estrazione del DNA e successiva amplificazione e sequenziamento di particolari regioni genomiche, che hanno permesso l'individuazione di diverse OTU.

OTU o cluster con somiglianza di sequenza a livello molecolare sono ampiamente accettati come unità analitiche utilizzate nell'ecologia microbica. Durante tutto lo sviluppo tassonomico, le OTU sono le unità più comunemente utilizzate durante l'analisi dei set di dati di sequenze geniche. Al giorno d'oggi, OTU è generalmente utilizzato in molti contesti. Nella maggior parte dei casi, si riferisce a gruppi di microrganismi non coltivabili che sono raggruppati in base alla loro somiglianza di sequenza del DNA. Questa somiglianza è rilevata da uno specifico gene marcatore tassonomico. In altre parole, a causa dell'assenza dei tradizionali sistemi di classificazione biologica, le OTU sono utilizzate come termini sostitutivi pragmatici per individui microbici a diversi livelli tassonomici. Le sequenze possono essere raggruppate in base alla somiglianza. Come stabilito dal ricercatore, la soglia che di solito è al 97% di somiglianza determina il raggruppamento delle unità tassonomiche operative. Il gene dell'RNA ribosomiale 16s è comunemente usato per studiare la comunità microbica.

3.1.1 Estrazione DNA

Il DNA è stato estratto da 0.4 g di ciascun suolo seccato all'aria utilizzando il MoBio Power Soil DNA extraction kit (Qiagen). Il sequenziamento è stato effettuato presso la BMR Genomics, Padova: Amplificazione e sequenziamento della regione ITS e di quella 16S su piattaforma Illumina MiSeq nel formato di sequenziamento Paired-End 300bp, seguito da pipeline tassonomica su database RDP e GreenGenes.

Analisi Molecolari

L'elaborazione dei dati per la costruzione dei grafici è stata effettuata mediante le risorse online MicrobiomeAnalyst, SHAMAN e il software Past e con il programma Excel.

3.2 Indagine pedologica

L'apertura delle buche usate per il prelievo dei campioni microbiologici, ha avuto il principale obiettivo di mettere in luce i profili che caratterizzano i suoli glaciali. Al fine di studiare le diverse condizioni pedologiche, sono stati presi in esame ulteriori profili di suolo, ottenuti tramite scavo sempre in area periglaciale. I rilievi hanno quindi interessato entrambi i settori di Agola e Pratofiorito, aggiungendo però ai siti impiegati per la raccolta campioni, ulteriori situazioni pedologiche. Tali scavi, eseguiti tramite un piccolo piccone hanno permesso l'identificazione di alcuni orizzonti, la cui sequenza e successione permette la classificazione e di conseguenza anche l'interpretazione dei processi di formazione degli humipedon. La raccolta dati ha consistito nell'interpretazione in campo di tali profili dando particolare attenzione a fattori come caratteristiche vegetazionali, umidità, colore, struttura e tessitura. Si è poi cercato di individuare i limiti degli orizzonti e soprattutto la loro tipologia. Foto dei diversi profili hanno permesso in una seconda fase a tavolino di meglio interpretare e classificare questi particolari humipedon sulla base della successione dei diversi orizzonti. Ciascuna forma di humus corrisponde infatti ad una data sequenza di orizzonti caratteristici lungo il profilo del terreno. Nella classificazione delle forme di humus ci si riferisce sia agli orizzonti organici, costituiti esclusivamente da sostanza organica, che a quelli organo-minerali, nei quali la sostanza organica è frammista a quantità più o meno rilevanti di sostanza minerale. Lo studio delle forme di humus ha poi riguardato la superficie innevata del ghiacciaio, dove sono state osservate e annotate le diverse fasi di deterioramento ed evoluzione della neve. Alcune foto hanno aiutato poi nell'interpretazione e classificazione sia sul ghiacciaio d'Agola che su quello di Pratofiorito.

3.3 Campionamento microbiologico e rilevamento pedologico

3.3.1 Settore Agola

Il primo sito è stato individuato nei pressi di un piccolo laghetto proglaciale originatosi quindi per l'azione di sbarramento di una morena durante la ritirata del ghiacciaio a quota di 2596 m s.l.m. Qui sono state aperte 2 diverse buche:

- La prima ha interessato una porzione di suolo coperto unicamente da detrito. La profondità di scavo è stata di circa 50 cm. Qui sono stati prelevati i campioni denominati So1-10 e So1-50 ed è stato eseguito il relativo rilevamento pedologico.
- La seconda ha invece riguardato il suolo e la rizosfera presenti al di sotto di una pianta appartenente al genere *Sedum*. Qui sono stati prelevati i campioni denominati So1RS e So1RS-10 ed è stato associato il rilevamento delle forme di humus.

Il secondo sito è stato individuato a quota di 2300 m s.l.m. circa, lungo l'evidente morena glaciale che per centinaia di metri scende verso la Val Nardis. Qui sono state aperte due buche a poche decine di cm di distanza: una coperta da vegetazione e l'altra con presenza unicamente di detrito. La specie vegetale riscontrata era una pianta di *Papaver alpinum*. Qui sono stati prelevati i campioni So2 e So2RPa e sono stati eseguiti i relativi rilievi pedologici.

3.3.2 Settore Pratofiorito

I due siti scelti in questo settore differiscono dal precedente per condizioni ambientali in quanto entrambi sono stati individuati a minor distanza dal ghiacciaio rispetto al caso dell'Agola. Il primo sito individuato a quota 2572 m s.l.m. ha riguardato il prelievo di un campione di suolo presente sotto il ghiaccio al limitare del fronte della vedretta. Si tratta in particolare della zona del capolinea, ovvero la parte frontale della lingua del ghiacciaio. Il secondo prelievo invece ha interessato una zona al limitare del fronte glaciale, alla medesima quota del precedente campionamento, senza tuttavia essere ricoperto da ghiaccio. Entrambi i profili vengono presentati nella sezione dedicata ai rilievi pedologici.

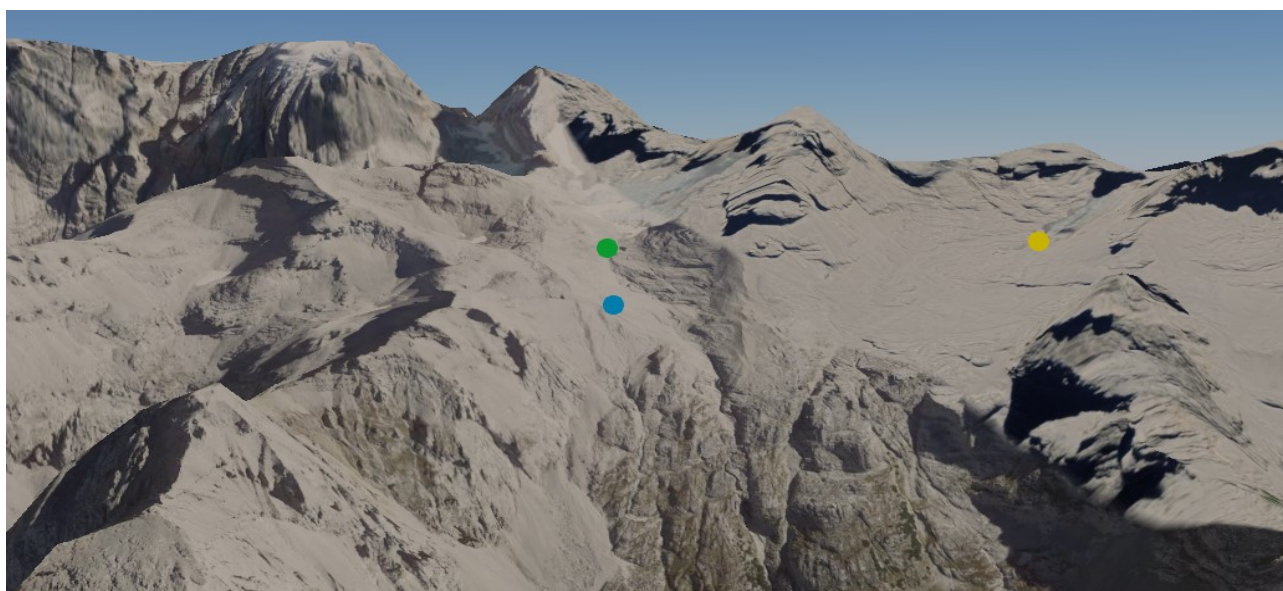


Figura 6. Immagine di Google Earth della Catena d'Ambiez con i siti di prelievo.

Tabella 1. Siti di prelievo dei campioni. I colori sono in riferimento alla figura 6.

Sito	Settore	Quota (m s.l.m.)	Numero di campioni
1	Agola	2596	4
2	Agola	2300	2
3	Pratofiorito	2572	2

Tabella 2. Campioni raccolti per il sequenziamento.

Campione	Codice	Sito
suolo presso pozza proglaciale ghiacciaio d' Agola alla profondità di 50 cm	So1-50	1
suolo presso pozza proglaciale ghiacciaio d' Agola alla profondità di 10 cm	So1-10	1
suolo su crinale di morena glaciale	So2	2
suolo presso pozza proglaciale ghiacciaio d' Agola in rizosfera di <i>Sedum</i> sp.	So1RS	1
suolo presso pozza proglaciale ghiacciaio d' Agola a 10 cm di profondità sotto la pianta di <i>Sedum</i> sp.	So1RS-10	1
suolo su crinale di morena glaciale su rizosfera di <i>Papaver alpinum</i> , distante poche decine di cm da So2	So2RPa	2
suolo sotto lingua terminale di ghiaccio del ghiacciaio Pratofiorito	So/Ice:	3
suolo scoperto, inelle immediate vicinanze fuori dalla lingua terminale di ghiaccio del ghiacciaio Pratofiorito.	So/Thaw:	3

4. Dati e risultati

Tra i diversi “sistemi biologici” con i quali l'uomo interagisce quotidianamente, il suolo è sicuramente uno dei più usuali: sul suolo si cammina, si costruisce, il suolo si coltiva. Del suolo sono solitamente considerati gli aspetti chimici, fisici e meccanici, mentre comunemente si tende a trascurare la componente biologica che in esso vive e si riproduce. In realtà l'identificazione del suolo come sistema biologico, in altre parole come sistema sede di processi vitali, è di fondamentale importanza ai fini di una corretta comprensione del suo funzionamento e della sua evoluzione. Il suolo deve essere studiato tenendo conto che si tratta di un sistema biologico. Il terreno possiede molte caratteristiche che lo avvicinano agli organismi viventi. Esso è la sede di reazioni chimiche controllate che, nel loro insieme, sono l'espressione di un *quasi*-organismo. Il suolo rappresenta una delle più importanti riserve di biodiversità, spesso poco conosciuta, di diversi ordini di grandezza maggiore di quella descritta per il soprassuolo (Heywood, 1995); si stima infatti che nel suolo viva il doppio della quantità di specie riscontrabili nella foresta pluviale tropicale e che esso contenga dal 95 al 98% della biodiversità totale della Terra. La maggior parte degli organismi del suolo resta ad oggi sconosciuta: si stima, ad esempio, che le specie attualmente descritte per Nematodi, Acari e Protozoi siano meno del 5% del numero di specie totali (Wall et al., 2008). Alla componente vivente del suolo partecipano un'infinità d'organismi. Batteri, funghi, alghe (microflora) e una notevole varietà d'animali, dagli unicellulari protozoi ai più evoluti mammiferi (pedofauna), compiono nel suolo il loro ciclo vitale, o parte di esso. Fanno parte della componente vivente del suolo anche gli organi sotterranei delle piante, le radici, che garantiscono alla porzione epigea il nutrimento, l'ancoraggio e, in alcuni casi, la perpetuazione. L'abbondanza di questa componente, in termini numerici e di biomassa, è estremamente variabile in funzione delle caratteristiche chimiche e fisiche del suolo e del tipo di copertura vegetale. Gli organismi viventi del suolo appartengono, in larga parte, ai raggruppamenti tassonomici di Procarioti ed Eucarioti o ai domini Bacteria, Archea, comprendenti rispettivamente i Batteri propriamente detti e quelli estremamente primitivi estremofili, ed Eucarya, con Animali, Piante, Funghi, Protozoi e Alghe. Gli organismi del suolo

sono talmente numerosi che risulta alquanto difficile selezionare alcuni gruppi ritenendo che essi siano più importanti di altri (Giordano, 1999). Gli organismi del suolo, infatti, regolano e provvedono alla trasformazione della sostanza organica e al ciclo del carbonio e dei nutrienti, negli ecosistemi terrestri (Swift et al. 1979). Essi contribuiscono in modo diretto ed indiretto alla degradazione dei residui, alla pedogenesi, alla formazione e all'alterazione struttura del suolo e, infine, alla regimazione delle acque (Lavelle et al., 2006). È ampiamente risaputo che i microrganismi sono anche i primissimi colonizzatori di terreni recentemente esposti in ambienti deglaciali. La vita di funghi e batteri è considerata fondamentale per stabilizzare i suoli e modellare lo sviluppo fisico e biologico di questi ecosistemi. Questi particolari organismi, appartenenti a 2 gruppi tassonomici distinti, regno Funghi e regno Bacteria, sono stati indagati con le medesime metodologie e i risultati vengono ora presentati partendo dai batteri. L'indagine ha riguardato in modo particolare lo studio della diversità delle due distinte comunità di organismi presenti in questi ambienti estremi. Lo studio della biodiversità edafica in ambienti glaciali, infatti, può contribuire a comprendere il funzionamento di ecosistemi più complessi, oltre che a studiare la risposta della biodiversità edafiche nei confronti dei predetti cambiamenti climatici (Wall et al., 1999).

4.1 Batteri e Archea

I batteri sono in assoluto gli organismi più numerosi presenti nel suolo; il loro numero estremamente variabile secondo l'ambiente considerato, è stimato essere dell'ordine di $10^6 - 10^9$ batteri per grammo di suolo (Florenzano, 1983), corrispondenti a una biomassa di circa 1500 kg/ha. Sono organismi unicellulari, procarioti, talvolta mobili. I batteri sono spesso riuniti in colonie. L'importanza dei batteri all'interno del suolo è considerevole e risaputa, con riferimento sia agli effetti di tale componente vivente sulle caratteristiche chimico fisiche del suolo, che a riguardo del ruolo biogeochimico svolto. Il ruolo principale della componente batterica consiste nell'azione di trasformazione dei residui vegetali e animali del suolo. Attraverso processi di idrolisi, le macromolecole organiche costituenti tali residui subiscono una decomposizione biochimica in composti minerali semplici (mineralizzazione); una parte di tali sostanze è impiegata nella sintesi di biopolimeri (umificazione) costituenti un'importante frazione della sostanza organica umificata. Tuttavia, l'importanza di questi organismi è forse ancora più evidente negli ecosistemi ghiacciati: a differenza di altri biomi terrestri, gli ecosistemi dei ghiacciai sono guidati esclusivamente dall'attività biologica dei batteri. L'abbondanza di cellule batteriche nei ghiacciai varia in modo significativo tra 10^7 cellule L^{-1} nella neve pulita e nel ghiaccio da 3 a 10^{11} cellule L^{-1} (Lutz S., 2014). La maggior parte della biomassa microbica si concentra nei fori di crioconite dove esistono minuscoli ecosistemi che ospitano un complesso consorzio di alghe, fotoautotrofi procariotici ed eterotrofi. Tra i componenti più importanti dell'ecosistema sopragliaciale troviamo i cianobatteri che dominano la produzione di carbonio nei fori di crioconite, mentre gli eucarioti Zygnematales e Chlamydomonadales dominano rispettivamente le superfici ghiacciate e la dinamica della neve (Alexandre M. et al., 2017). Alghe e cianobatteri di neve e ghiaccio sono quindi i principali produttori primari e ingegneri dell'ecosistema. Sono responsabili dell'accumulo di materia organica sulla superficie dei ghiacciai, che a sua volta porta a feedback positivi tra la fusione e l'attività microbica. La materia organica prodotta sulla superficie della neve e del ghiaccio da quegli ingegneri dell'ecosistema può anche essere trasportata attraverso il sistema en glaciale fino agli ambienti subglaciali, alimentando i processi microbici sotto il ghiaccio, oppure può essere trasportata in

superficie e costituire un importante meccanismo per la consegna di nutrienti agli ecosistemi a valle. La diversità dei principali ingegneri dell'ecosistema che abitano i ghiacciai e le calotte glaciali è considerata relativamente limitata. I principali produttori primari di buchi di neve, ghiaccio e crioconite sembrano essere gli stessi in tutto il mondo (Christmas NAM, 2015). Esiste quindi una notevole somiglianza tra i diversi habitat glaciali di tutto il mondo, in particolare per quanto riguarda i loro principali produttori primari e ingegneri dell'ecosistema. In superficie, i cianobatteri dominano la produzione di carbonio nei fori di crioconite, mentre gli eucarioti Zygnematales e Chlamydomonadales dominano rispettivamente le superfici di ghiaccio e la dinamica della neve. A livello di genere e più spesso a livello di specie, i taxa di alghe della neve e del ghiaccio sono i medesimi nell'Artico, nell'Antartide e nelle Alpi (Christmas NAM, 2015). La comunità batterica eterotrofica associata invece è molto più diversificata e probabilmente influenzata da una serie di fattori locali, rispetto ai produttori primari. Mentre ci sono pochissimi dubbi sull'idoneità dei produttori primari a prosperare su ghiacciai e calotte glaciali, come dimostrato dalla loro capacità di produrre e accumulare materia organica in questi habitat, pochissimi studi hanno determinato quanta parte della comunità batterica eterotrofica sia effettivamente attiva in l'ambiente sopraglaciaie (Alexandre M., 2017). In virtù della "ridotta" variabilità che caratterizza le comunità batteriche del bioma ghiacciaio e dei numerosi studi fatti in tutto il mondo in tale ambito, possiamo dire di disporre di una modica conoscenza in merito. Lo stesso non si può affermare per le comunità batteriche che vivono nelle aree periglaciali e sul detrito recentemente esposto. Le vedrette della catena d'Ambiez potrebbero scomparire nell'arco di due decenni, lasciando un nuovo habitat da colonizzare o a cui adattarsi.

Di seguito vengono presentati i risultati dello studio delle comunità batteriche.

Un totale di 1602 diverse unità tassonomiche operative batteriche è stato ottenuto dagli otto campioni prelevati attraverso il sequenziamento. Il numero di unità operative tassonomiche all'interno dei campioni varia tra 59 e 444. I dati ottenuti dal sequenziamento dei campioni mostrano importanti differenze per quanto riguarda la ricchezza e la diversità della comunità batterica.

La prima analisi dei dati qui mostrata in Figura 7 mostra le differenze relative tra le comunità batteriche. La lunghezza dei rami orizzontali che separano i campioni è proporzionale alla loro differenza compositiva.

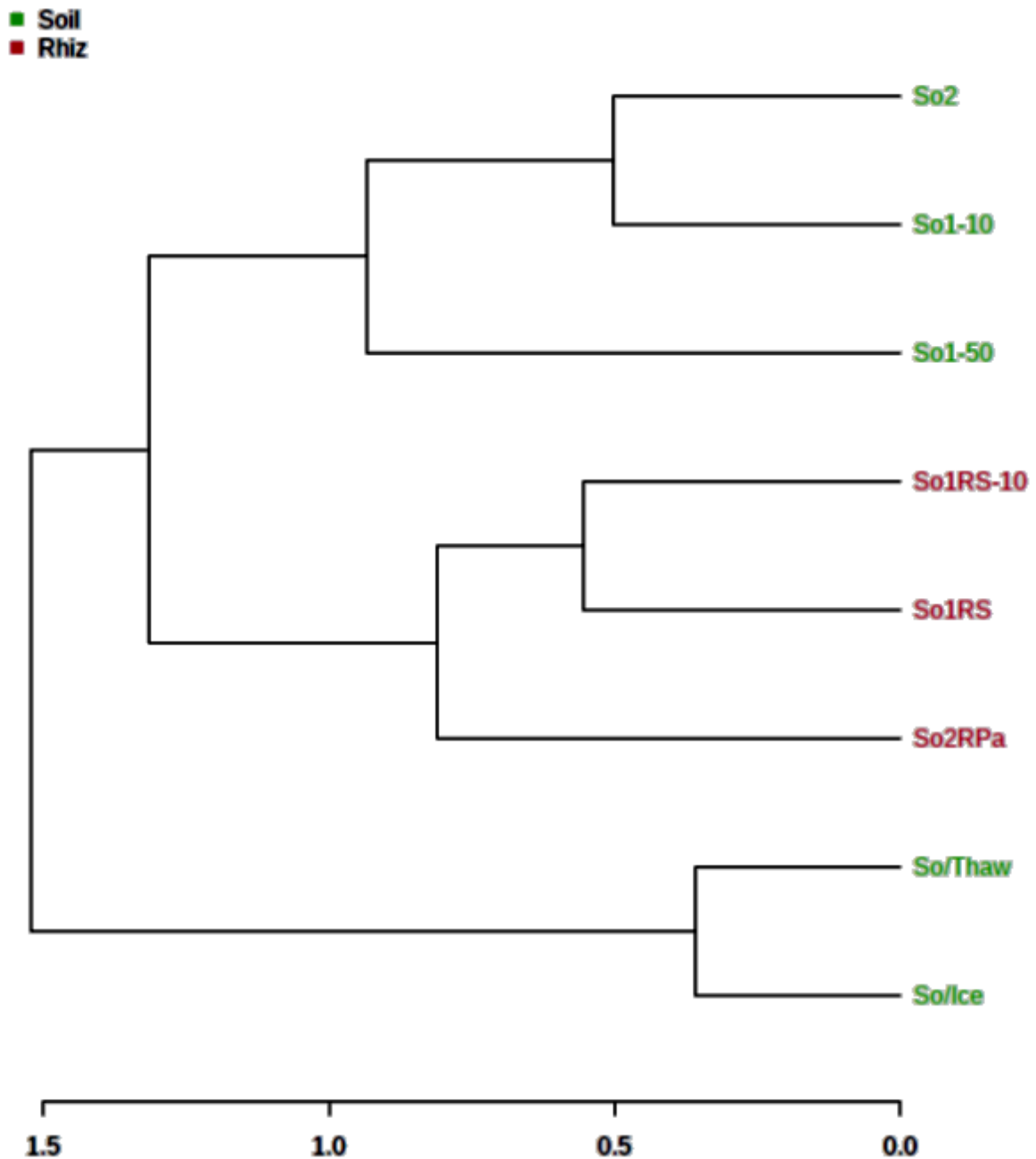


Figura 7. Analisi di cluster con la ripartizione delle comunità in dendrogramma Neighbor Joining basato sulle distanze di Bray-Curtis, proporzionali alle differenze di presenza e abbondanza delle specie batteriche presenti in ciascun campione.

È possibile osservare tre cluster principali e che nell'ambito degli stessi i suoli non rizosferici di Agola abbiano maggior affinità tra loro che non con quelli rizosferici indipendentemente alla prossimità. Parallelamente i suoli rizosferici, anche se di piante diverse, si raggruppano in un proprio cluster. I suoli del ghiacciaio Pratoriorito appaiono molto differenti da quelli del ghiacciaio d'Agola.

La ripartizione delle diverse comunità in base alla gerarchia della variabile Rizosfera/Suolo non rizosferico può essere ben osservata analizzando l'ordinamento dei dati in una analisi dei componenti principali, come mostrato in Figura 8.

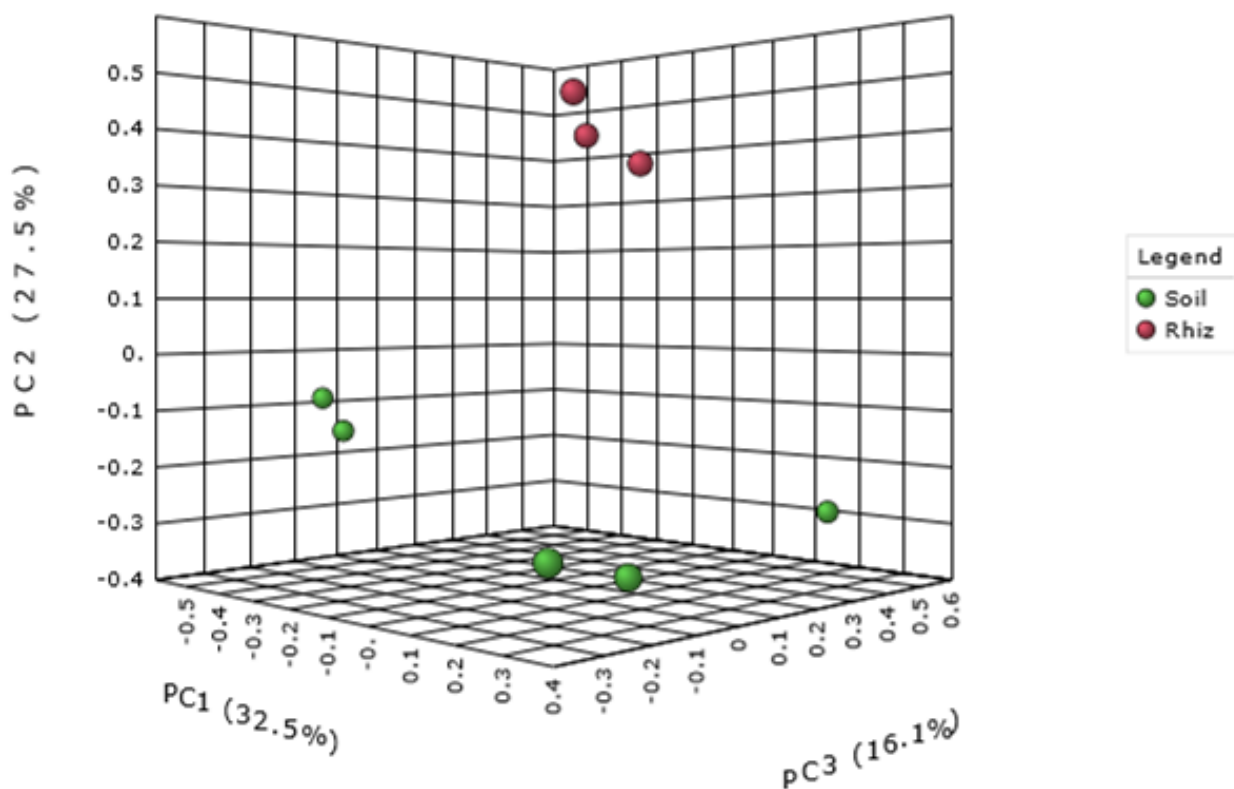


Figura 8. Analisi multivariata dei componenti principali in tre dimensioni, sui dati delle comunità batteriche. Confronto tra i campioni di suolo e quelli di rizosfere.

Si può notare la chiara differenziazione delle comunità rizosferiche rispetto a quelle dei suoli, indicando l'effetto della vegetazione quale fattore di primaria importanza nel plasmare la composizione delle comunità batteriche.

La differenza tra le comunità batteriche dei campioni (beta-diversità) può essere osservata dettagliatamente dalla analisi delle distanze di Whittaker (Whittaker, 1960; Routledge, 1977), i cui i confronti a coppie tra tutte le otto comunità sono mostrati in Fig. 9. L'indicatore è basato sulla formula in cui il numero totale di specie di un campione è diviso per il n. medio di specie della serie di campioni analizzato -1, e che di conseguenza varia tra 0 (stessa comunità) a 1 (massima distanza compositiva tra le comunità)

	So1-50	So1-10	So1RS	So1RS-10	So2RPa	So2	So/Ice	So/Thaw
So1-50	0	0,82249	0,95397	0,9272	0,9697	0,88811	0,98643	0,95804
So1-10	0,82249	0	0,92067	0,91205	0,93573	0,86111	0,95937	0,92558
So1RS	0,95397	0,92067	0	0,62981	0,76372	0,9117	0,94149	0,94587
So1RS-10	0,9272	0,91205	0,62981	0	0,78912	0,95171	0,92462	0,91571
So2RPa	0,9697	0,93573	0,76372	0,78912	0	0,96421	0,91771	0,92902
So2	0,88811	0,86111	0,9117	0,95171	0,96421	0	0,98082	0,96535
So/Ice	0,98643	0,95937	0,94149	0,92462	0,91771	0,98082	0	0,65861
So/Thaw	0,95804	0,92558	0,94587	0,91571	0,92902	0,96535	0,65861	0

Tabella 3. Analisi di beta-diversità. Distanze di whittaker tra le comunità batteriche analizzate.

È possibile osservare come le distanze tra campioni di suolo siano minori di quelle tra ciascuna di esse e le comunità rizosferiche.

Per quanto riguarda invece la alfa-diversità, sono stati calcolati gli indici ecologici di diversità e di equipartizione (assenza di dominanza di ristretti numeri di specie e equilibrio tra tutti i taxa) di ciascuna comunità. I risultati sono illustrati in figura 9.

È osservabile, evidenziato anche alla formattazione condizionale, come nelle comunità di rizosfera si riscontrino i valori più abbondanti.

	So1-50	So1-10	So1RS	So1RS-10	So2RPa	So2	So/Ice	So/Thaw
Taxa_S	84	85	394	438	444	59	358	345
Individuals	4424	986	127148	12467	99688	571	60307	11165
Simpson_1-D	0,6236	0,922	0,9916	0,9917	0,9937	0,8875	0,9847	0,9841
Shannon_H	2,181	3,695	5,441	5,504	5,625	3,276	5,115	4,98
Evenness_e^H/S	0,1054	0,4737	0,5857	0,561	0,6243	0,4487	0,4653	0,4218

Tabella 4. Numero di taxa riscontrati, abbondanza di individui e indici ecologici di alfa-diversità (Simpson e Shannon) e di equipartizione (Evenness), nelle comunità batteriche.

A questo proposito, presentando i dati accorpati si può meglio apprezzare come nel gruppo dei suoli rizosferici i valori di biodiversità di Shannon (Figura 9) e di Simpson (Figura 10), registrino valori più alti di quelli del gruppo dei suoli.

Figura 9. Indice ecologico di diversità di Shannon. Confronto tra i campioni di suolo e quelli di rizosfere

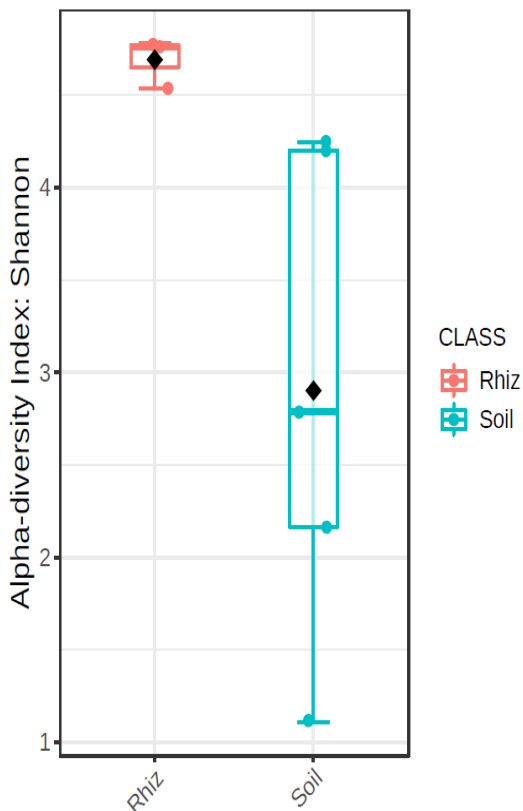
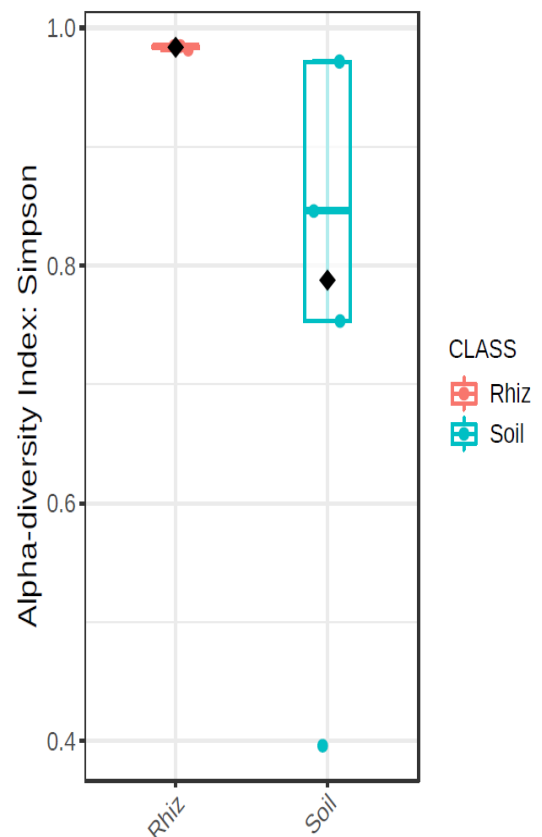


Figura 10. Indice ecologico di diversità di Simpson. Confronto tra i campioni di suolo e quelli di rizosfere



Le curve di rango abbondanza (figure 11 e 12) mostrano un modello di distribuzione riconducibile alla serie geometrica per i suoli non rizosferici e un modello di distribuzione delle abbondanze attribuibile al modello teorico “Broken stick” – (MacArthur, 1957) per i suoli rizosferici.

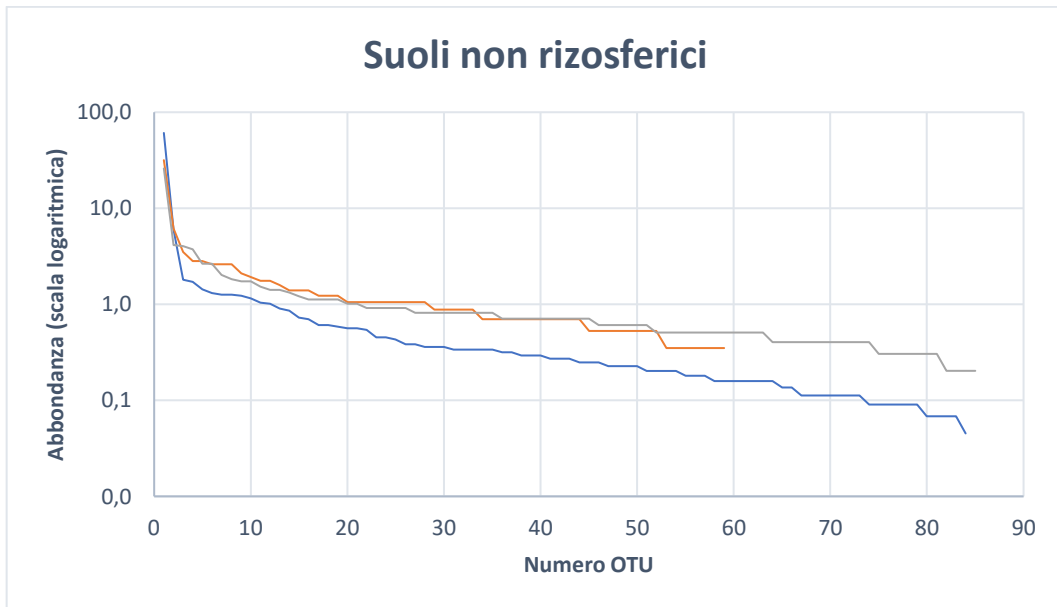


Figura 11. Curve di rango-abbondanza di suoli non rizosferici

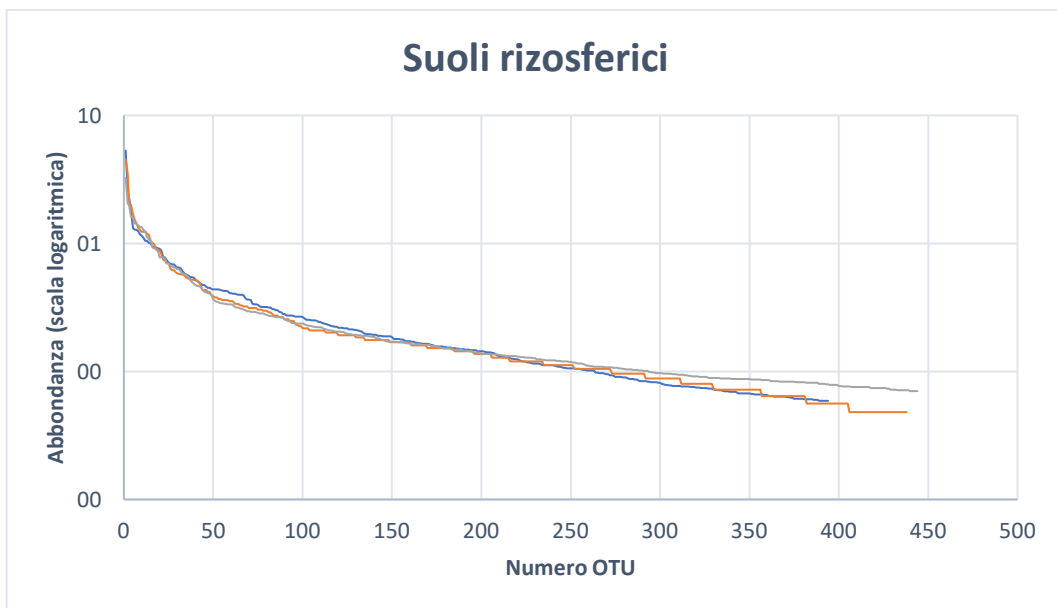


Figura 12. Curve di rango-abbondanza di suoli rizosferici

Venendo alla composizione tassonomica, A livello di phyla (Figura 13) i batteri mostrano, oltre alla maggior abbondanza di individui nei campioni rizosferici rispetto a quelli dei suoli, di essere dominati dal phylum di Proteobacteria, seguito da quello degli Actinobacteria (attinomiceti) e degli Acidobacteria, Bacteroidetes e Chloroflexi.

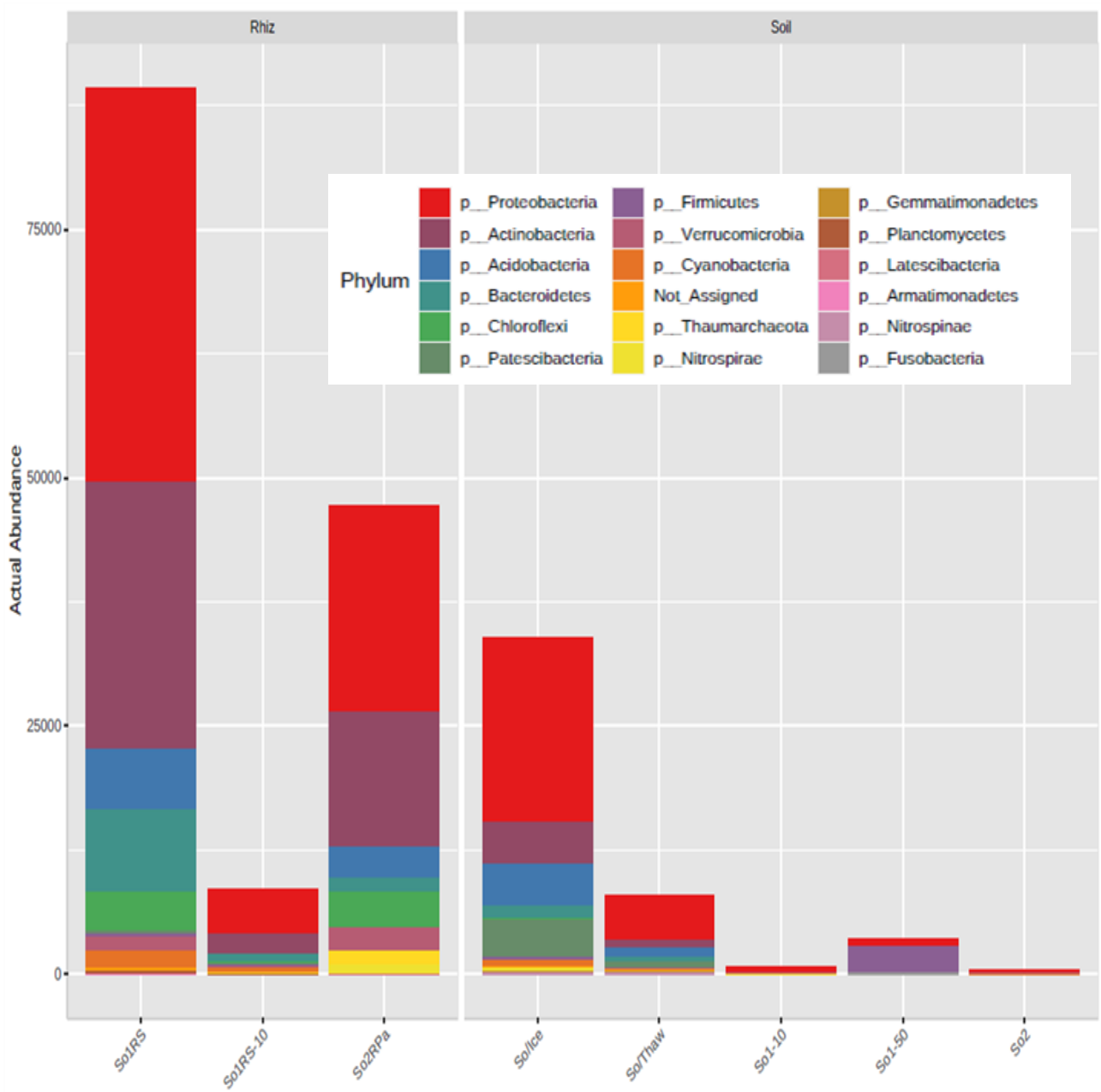


Figura13. Istogrammi di abbondanza delle comunità batteriche a livello di phylum.

Ma per meglio apprezzare le differenze, è utile visualizzare gli stessi dati in rappresentazione cumulativa percentuale, come visibile nella figura 14. In questo caso si evince come la comunità del suolo campionato alla profondità di 50 cm mostri una preponderanza del phylum Firmicutes, ovvero gram positivi, la cui abbondanza è, solo in questo suolo, maggiore anche di quella dei Proteobacteria, denotando una differenza verosimilmente legata alle condizioni di profondità, per questo phylum capace di formare spore quiescenti e durevoli, a differenza della maggior vegetatività che caratterizza i Proteobacteria. Si apprezza inoltre come i due suoli del ghiacciaio Pratofiorito, uno ancora sotto il ghiaccio e l'altro scoperto, siano tra loro relativamente molto simili dal punto di vista delle differenze tra comunità batteriche a livello di phylum.

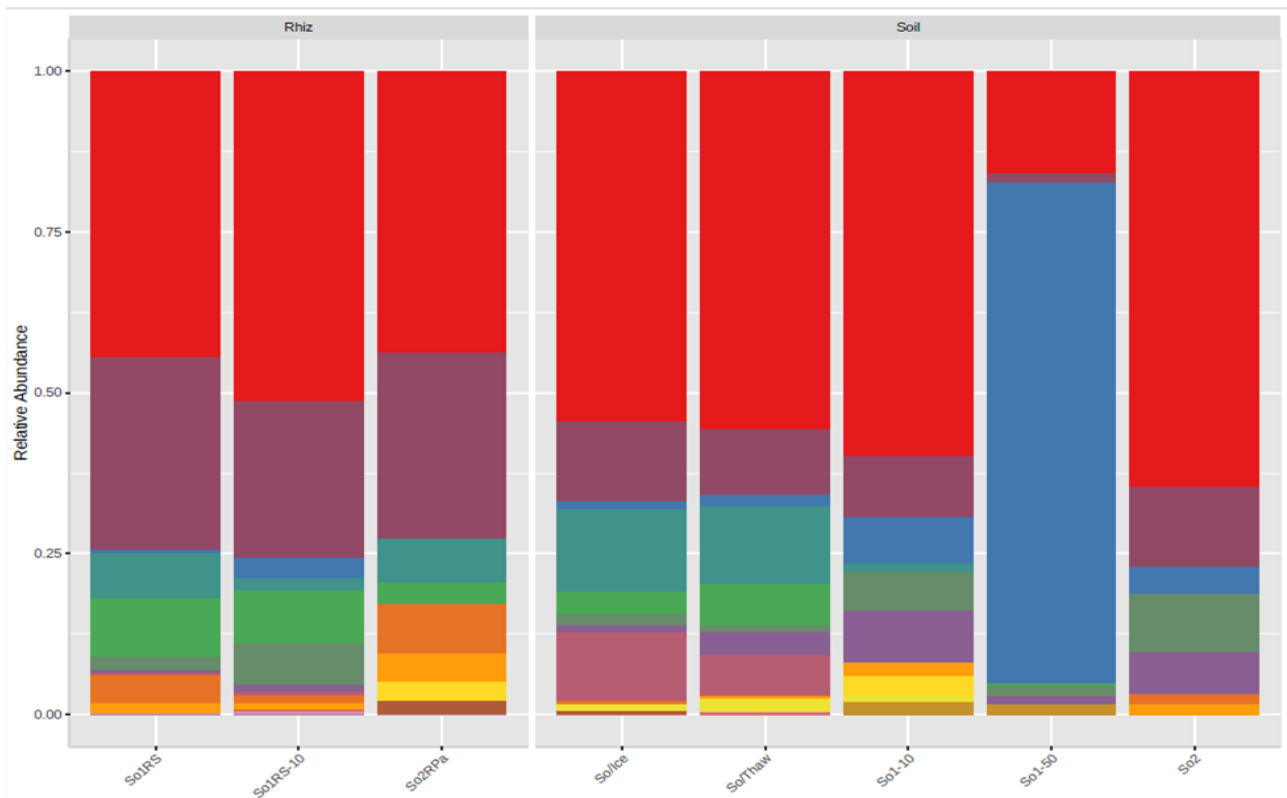
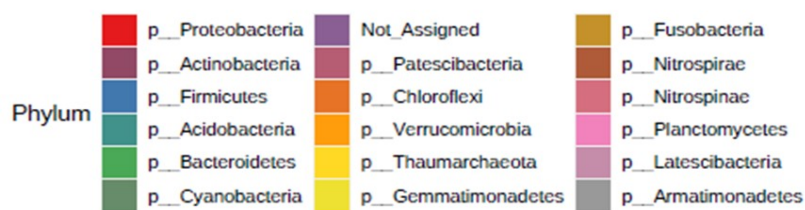


Figura 14. Istogrammi di abbondanza delle comunità batteriche a livello di phylum visualizzati in forma di abbondanze relative cumulate in percentuale.

Analizzando invece a livello tassonomico più spinto (famiglie) gli stessi dati (Figura 15), i vari phyla sopra osservati mostrano di essere rappresentati prevalentemente dalle famiglie delle Burkholderiaceae, Sphingomonadaceae, e Nitrosomonadaceae, quest'ultima interessante indicatore di attività nitrificante, caratteristica di habitat in cui il metabolismo autotrofo prescinde dalla necessità di sostanza organica ma richiede ammonio.

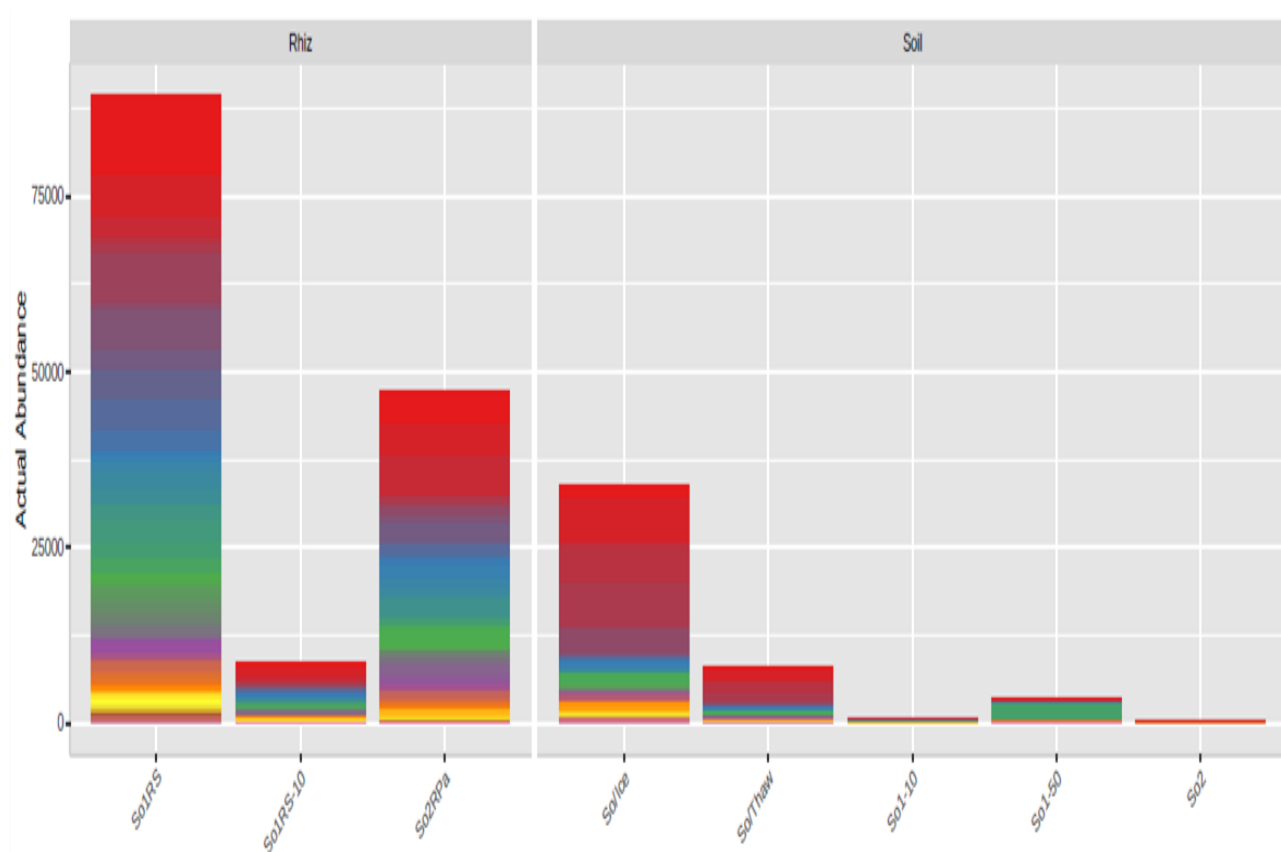
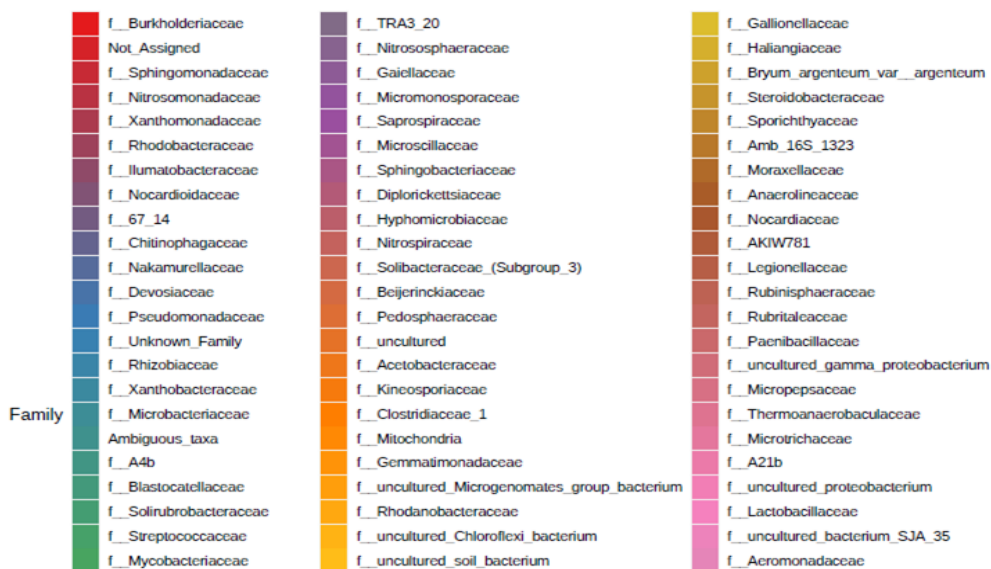


Figura 15. Istogrammi di abbondanza delle comunità batteriche a livello di famiglia.

4.2 Funghi

L'inquadramento sistematico dei funghi si è sempre dimostrato estremamente complesso e in continua evoluzione con il progredire delle conoscenze in materia. A tale eterogeneità tassonomica corrisponde in realtà una certa uniformità morfologica; la maggior parte dei funghi del suolo presenta infatti un apparato vegetativo detto "micelio", costituito da una rete più o meno ramificata di filamenti (ife); quale organo di dispersione e di sopravvivenza in condizioni ambientali sfavorevoli in funghi utilizzano le spore, la cui produzione avviene in corpi fruttiferi (Zanella et al., 2001). La quantità di funghi presenti nel suolo, in rapporto alla totalità della componente biologica, dipende in misura marcata dalle condizioni dell'ambiente edafico, con particolare riferimento al valore di umidità. È noto che l'attività della pedofauna diminuisce con l'aumentare dell'aridità del suolo; i primi a rallentare la loro azione sono gli anellidi, successivamente tocca agli artropodi. Grazie alla capacità di resistere a prolungati periodi siccitosi e a causa della diminuita attività di batteri e altri organismi da cui dipende la distribuzione delle ife, i funghi prendono mano a mano il sopravvento, fino ad arrivare a rappresentare pressoché completamente la componente biologica del suolo; ciò avviene in particolare nelle stazioni estremamente aride. La presenza di funghi all'interno del suolo, difficilmente esprimibile in termini di densità, è riferita alla biomassa, con valori medi dell'ordine di 3500 kg/ha. Gli studi sui funghi nella neve e nel ghiaccio sono rari e per lo più limitati alle muffe della neve, che non sono attive nella neve stessa, ma attaccano le piante dormienti sotto il manto nevoso (Matsumoto, N., 2012). Lieviti basidomiceti psicrofili sono stati segnalati in ambienti artici, (Lutz, S., 2016) antartici (Vishniac, 2006) e alpini (Buzzini, P. 2015). Solo di recente organismi appartenenti alla divisione dei *Chytridiomycota* sono stati descritti come abbondanti nella neve alpina e artica, (Lutz, S., 2016) dove si ritiene che svolgano un ruolo importante nel rilascio di nutrienti attraverso le loro attività saprotrofiche o parassitarie e nelle dinamiche della rete trofica della neve (Ibeling BW, et al., 2004). Li troviamo poi come simbionti nei licheni che crescono sulle rocce. Tuttavia, la loro diversità e funzione nella neve sono poco conosciute. I miceti sono importanti soprattutto perché abbattano residui organici, troppo secchi o a basso contenuto di azoto per la decomposizione batterica. (Eva

Garcia-Lopez and Cristina Cid, 2017). Di seguito vengono presentati i risultati dello studio delle comunità fungine.

Il sequenziamento ha interessato sette degli otto campioni analizzati per lo studio delle comunità batteriche. Assente è il sequenziamento del campionamento denominato So1-50 in quanto il sequenziamento non ha generato alcuna sequenza. Sono state identificate complessivamente 228 OTU. Il numero di unità operative tassonomiche all'interno dei campioni varia tra 4 e 93.

Passando alla analisi delle sequenze delle comunità dei funghi, il risultato dell'analisi di cluster per evidenziare la distanza tra le comunità è mostrato in Figura 16.

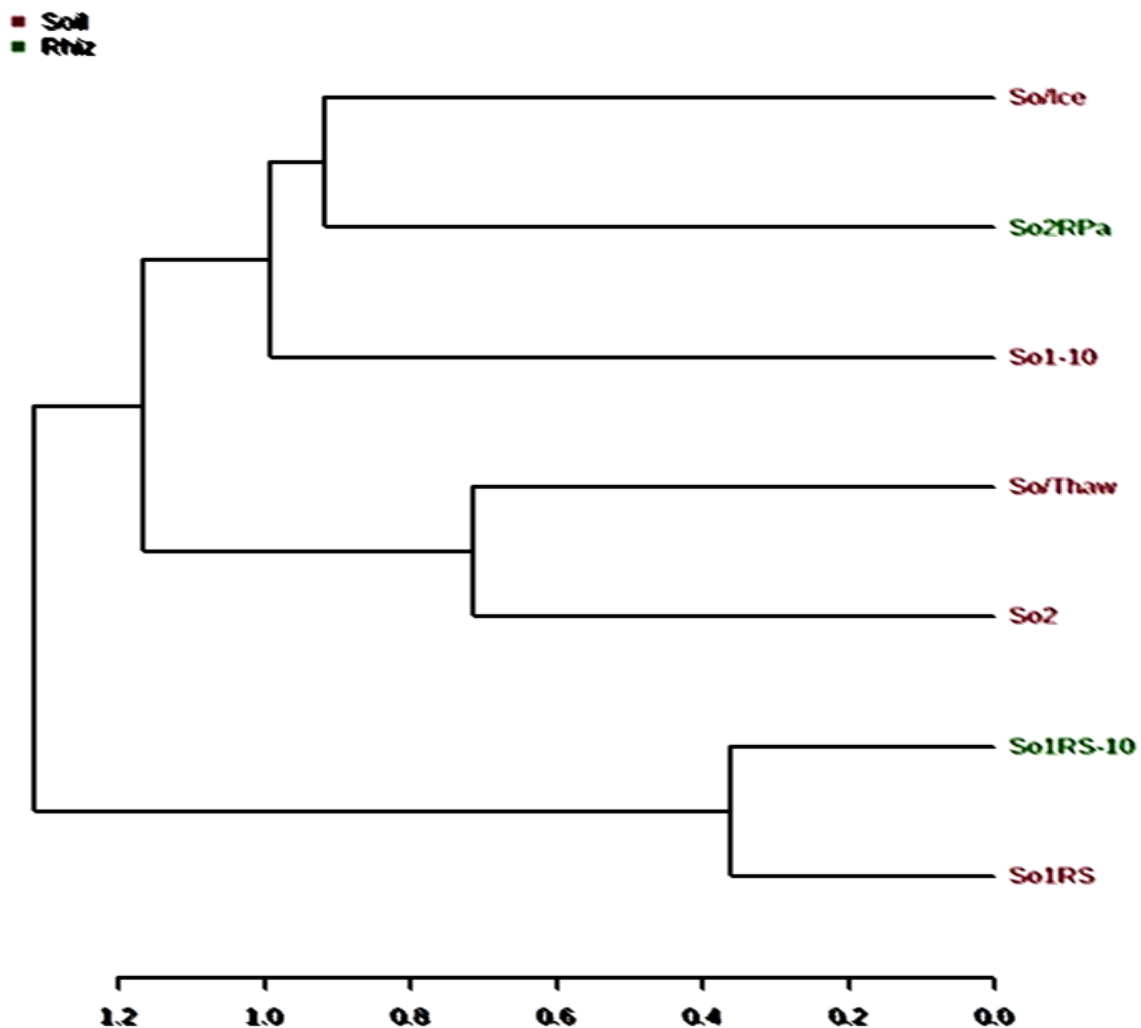


Figura 16. Analisi di cluster con la ripartizione della comunità in dendrogramma Neighbor Joining basato sulle distanze di Bay-Curtis, proporzionali alle differenze di presenza e abbondanza delle specie fungine presenti in ciascun campione.

Rispetto a quanto osservato per i batteri si può vedere che la ripartizione è molto meno vincolata dalla natura del campione, in quanto le comunità si presentano mescolate in maniera molto più libera e solo la rizosfera di *Sedum* sp. mostra analogie nette col campione prelevato verticalmente a 10 cm in profondità sotto la stessa.

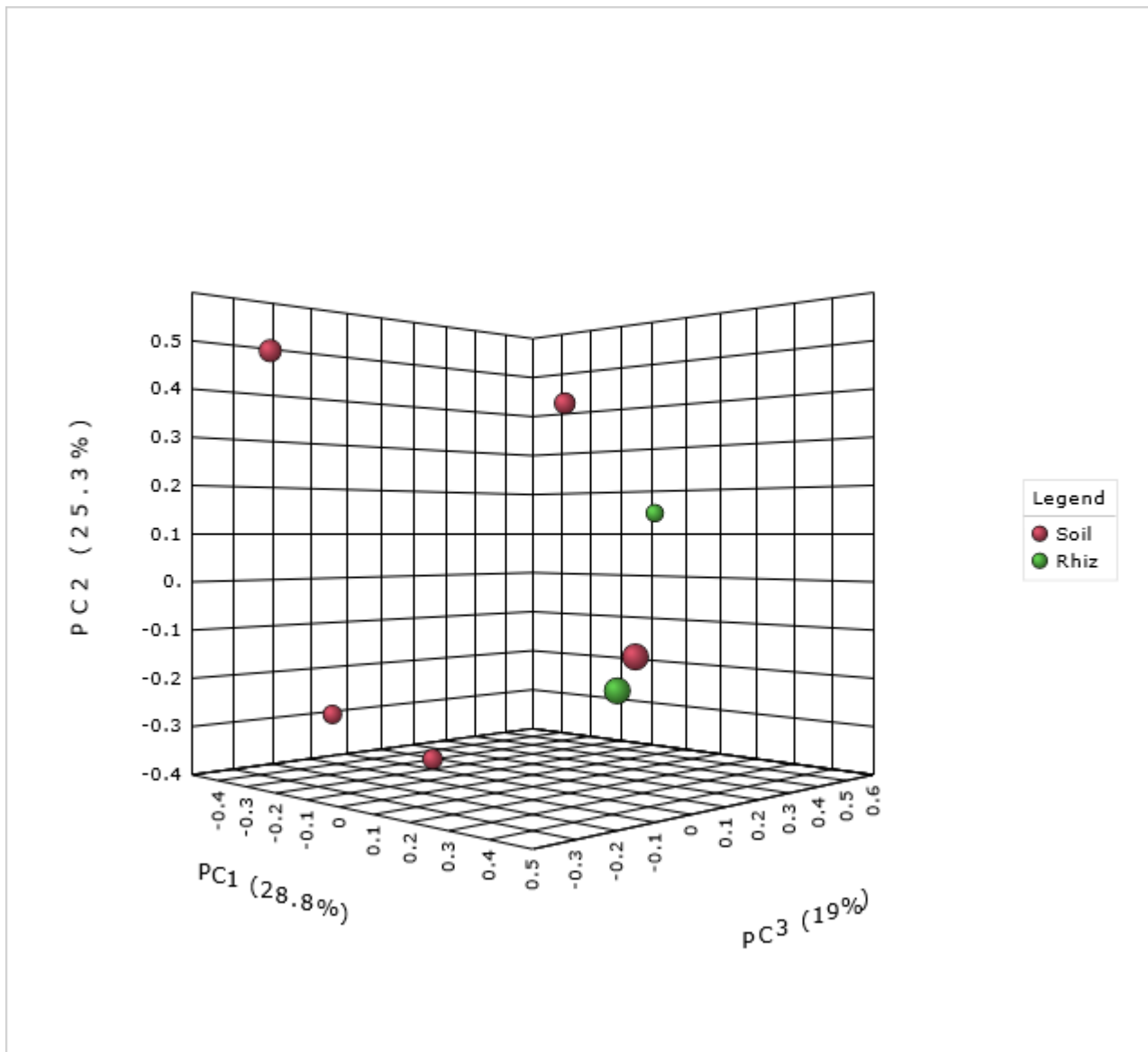


Figura 17. Analisi multivariata dei componenti principali in tre dimensioni, sui dati delle comunità fungine. Confronto tra i campioni di suolo e quelli di rizosfere.

Anche l'analisi multivariata dei componenti principali (Tabella 4) mostra il maggior mescolamento dei campioni di rizosfere e suoli rispetto a quanto visto per i batteri.

Tabella 4. Analisi della beta-diversità. Distanze di Whittaker tra le comunità fungine analizzate.

	So1-10	So1RS	So1RS-10	So2RPa	So2	So/Ice	So/Thaw
So1-10	0	0,97143	1	1	1	0,96364	1
So1RS	0,97143	0	0,74737	0,86164	0,92	0,89744	0,97531
So1RS-10	1	0,74737	0	0,93443	0,89474	0,9	1
So2RPa	1	0,86164	0,93443	0	0,96078	0,95833	1
So2	1	0,92	0,89474	0,96078	0	1	0,91667
So/Ice	0,96364	0,89744	0,9	0,95833	1	0	1
So/Thaw	1	0,97531	1	1	0,91667	1	0

La beta-diversità, nel caso dei funghi (Tabella 5) mostra, a differenza del confronto tra le comunità dei batteri, anche casi di comunità completamente differenti (valori =1).

Per quanto riguarda la alfa-diversità, nella tabella 5 sono riportati i valori dei rispettivi indici e nelle due successive i valori accorpati per tipo di campione (suoli o rizosfere).

Tabella 5. Numero di taxa riscontrati, abbondanza di individui e indici ecologici di alfa-diversità (Simpson e Shannon) e di equipartizione (Evenness), nelle comunità batteriche.

	So1-10	So1RS	So1RS-10	So2RPa	So2	So/Ice	So/Thaw
Taxa_S	4	66	29	93	9	51	15
Individuals	57	65764	2223	6759	162	2439	675
Simpson_1-D	0,7387	0,8559	0,7891	0,9323	0,846	0,8646	0,3863
Shannon_H	1,364	2,681	2,081	3,333	1,997	2,888	1,076
Evenness_e^H/S	0,9775	0,2212	0,2763	0,3013	0,8183	0,3521	0,1955

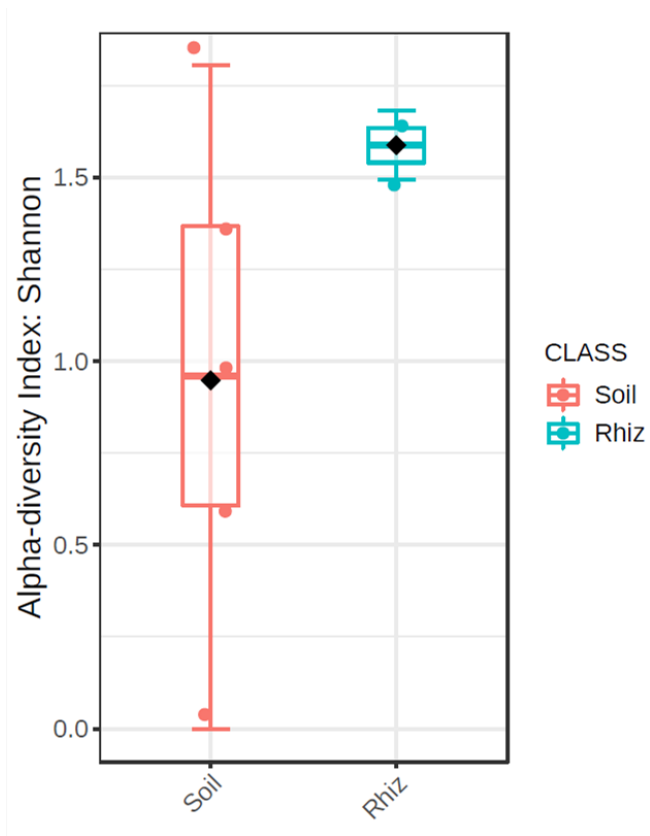


Figura 18. Indice ecologico di diversità di Shannon per le comunità fungine. Confronto tra i campioni di suolo e quelli di rizosfere.

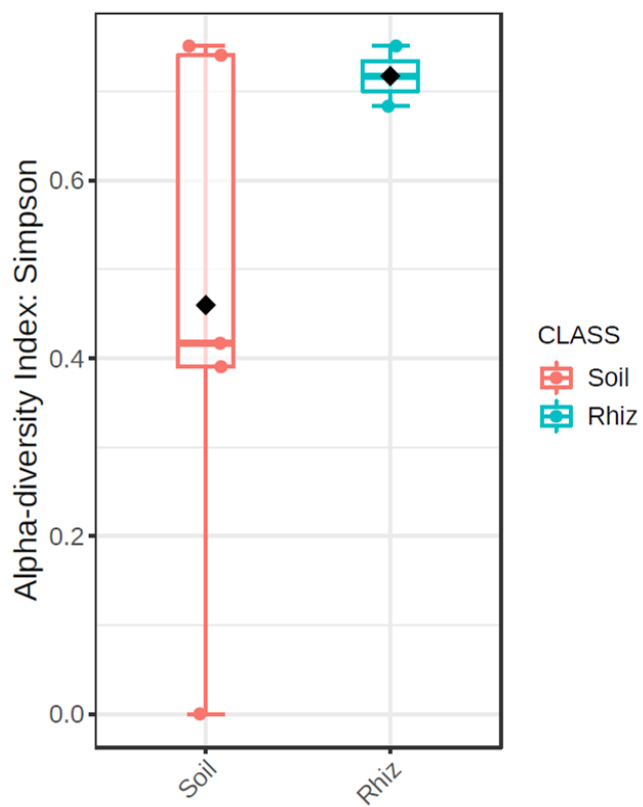


Figura 19. Indice ecologico di diversità di Simpson per le comunità fungine. Confronto tra i campioni di suolo e quelli di rizosfere.

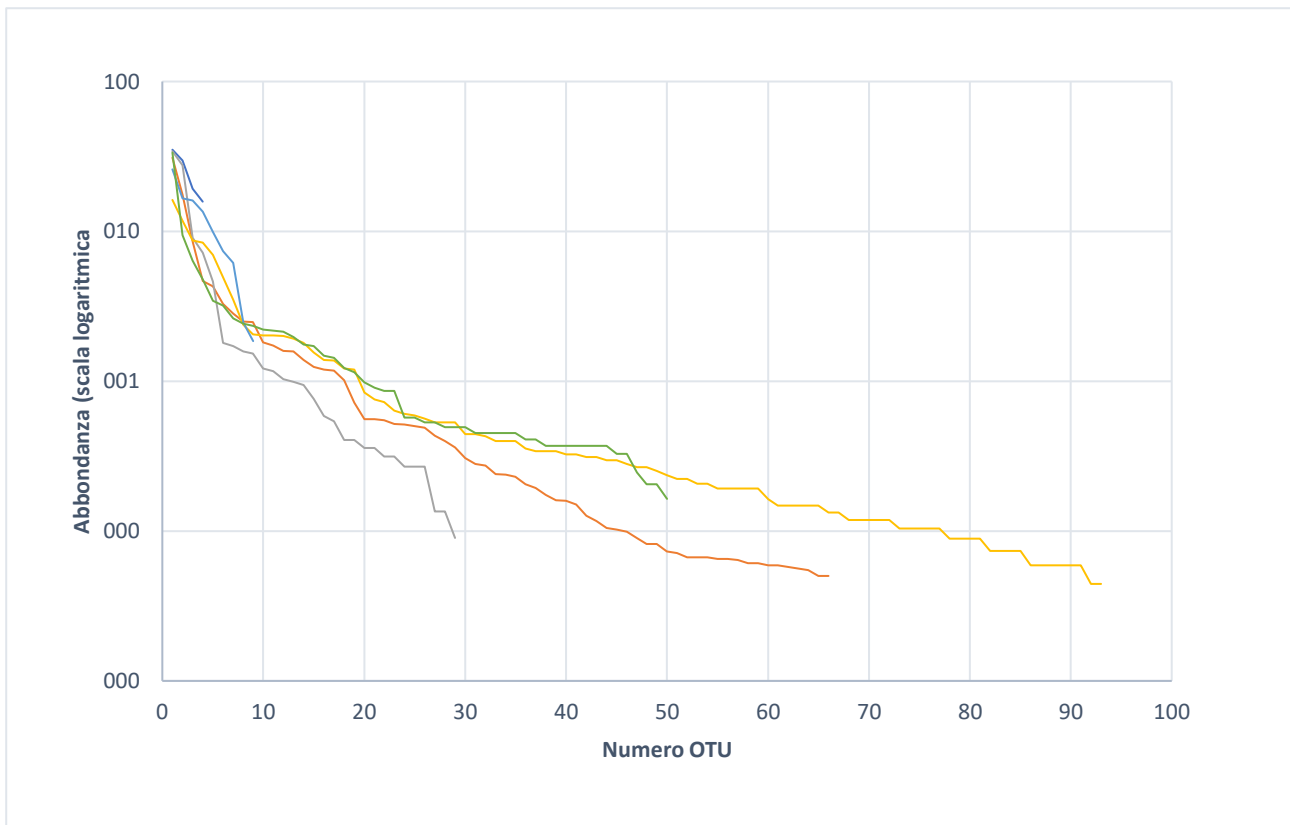


Figura 20. Curve rango-abbondanza delle comunità fungine.

La curva rango abbondanza degli organismi eucarioti mostra un modello riconducibile al modello log-normale per suoli non rizosferici e modello geometrico per suoli rizosferici nel quale vi sono poche specie molto abbondanti e molte specie rare.

Per quanto riguarda la tassonomia degli eucarioti osservati (Figura 21), i funghi dominanti appartengono al phylum degli ascomiceti (Ascomycota). È apprezzabile quanto preponderante in termini di abbondanza si riveli il campione della rizosfera di *Sedum sp.* anche rispetto a quella di *Papaver alpinum*. La dipendenza dei funghi dalla sostanza organica, essendo eterotrofi, rende peraltro attesa una differenza di abbondanze rispetto al suolo privo di vegetazione come caratteristico di questi habitat detritici di alta quota. È da rimarcare anche che nel caso dell'analisi dei funghi i campioni sono sette anziché otto come per i batteri poiché il campione del suolo alla massima profondità (50 cm) non ha generato alcuna sequenza eucariotica, in

linea con la estrema carenza di sostanza organica a tale profondità.

Interessante inoltre notare che il suolo sotto il ghiaccio del ghiacciaio Pratofiorito (So/Ice) mostra una comunità più abbondante rispetto a quella, poco percettibile dello stesso suolo nella versione deglaciata (So/Thaw).

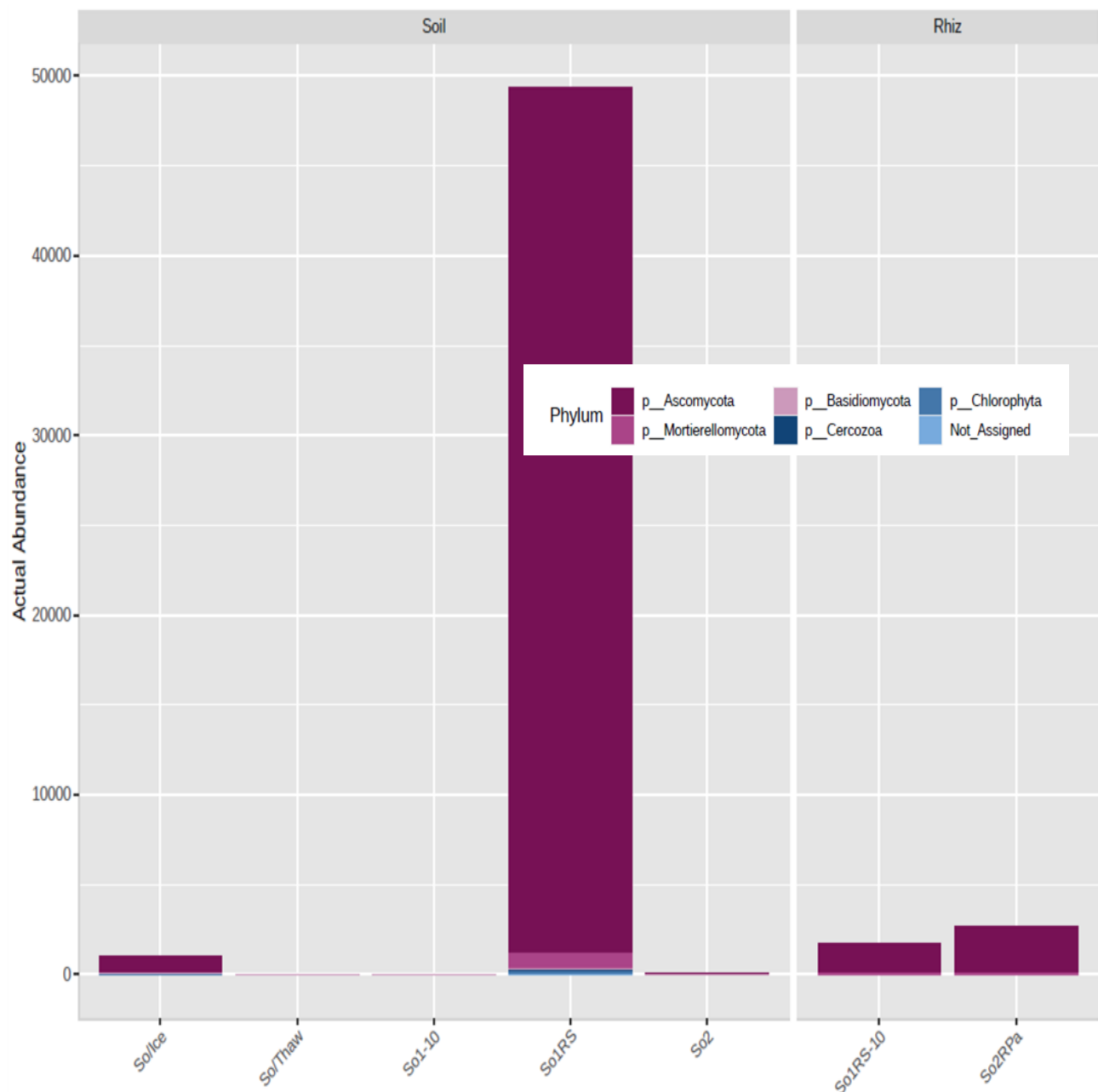


Figura 21. Istogrammi di abbondanza delle comunità eucariotiche a livello di phylum.

Passando a un livello tassonomico molto più dettagliato, i generi che compongono i phyla osservati nella precedente figura, sono esplicitati negli istogrammi di Figura 22. Il più abbondante, e riscontrato essenzialmente nella rizosfera di *Sedum*, è l'ascomicete *Leptosphaeria* il genere è noto includere specie patogene di vegetali (Sprague et al., 2007). Nella rizosfera di *Papaver* invece il genere di fungo più abbondante è *Tetracladium*, e in questo caso rappresenta invece un possibile simbionte radicale (Lazar et al., 2022).

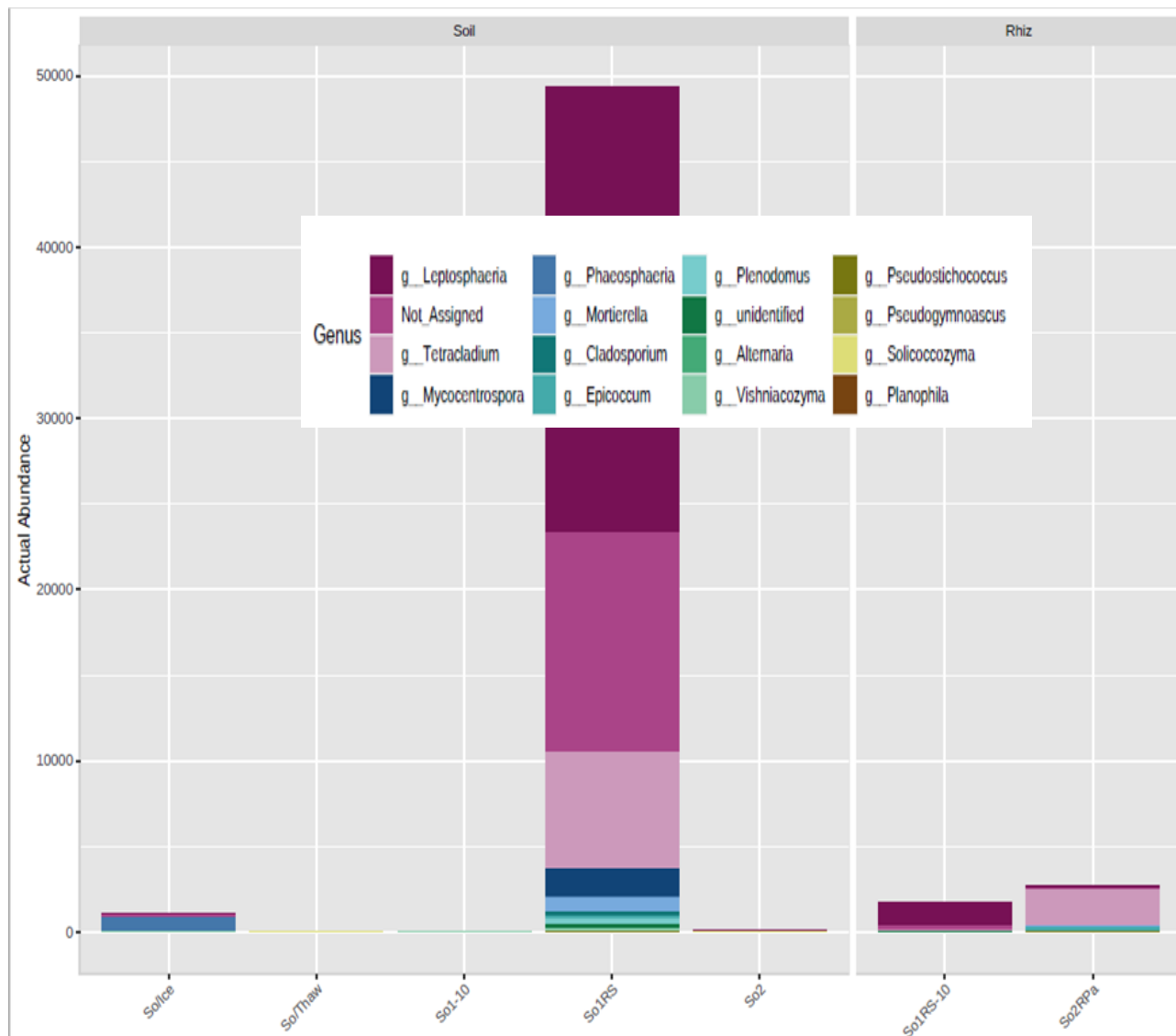


Figura 22. Istogrammi di abbondanza delle comunità eucariotiche a livello di genere.

Data la dominanza di abbondanza di alcuni funghi in alcuni campioni, per evidenziare anche la composizione negli altri, è opportuno visualizzare i dati non come abbondanze totali ma in percentuale cumulata (Figura 23). In questo caso si può osservare anche la composizione dei campioni che nella visualizzazione della figura precedente che risultava compressa.

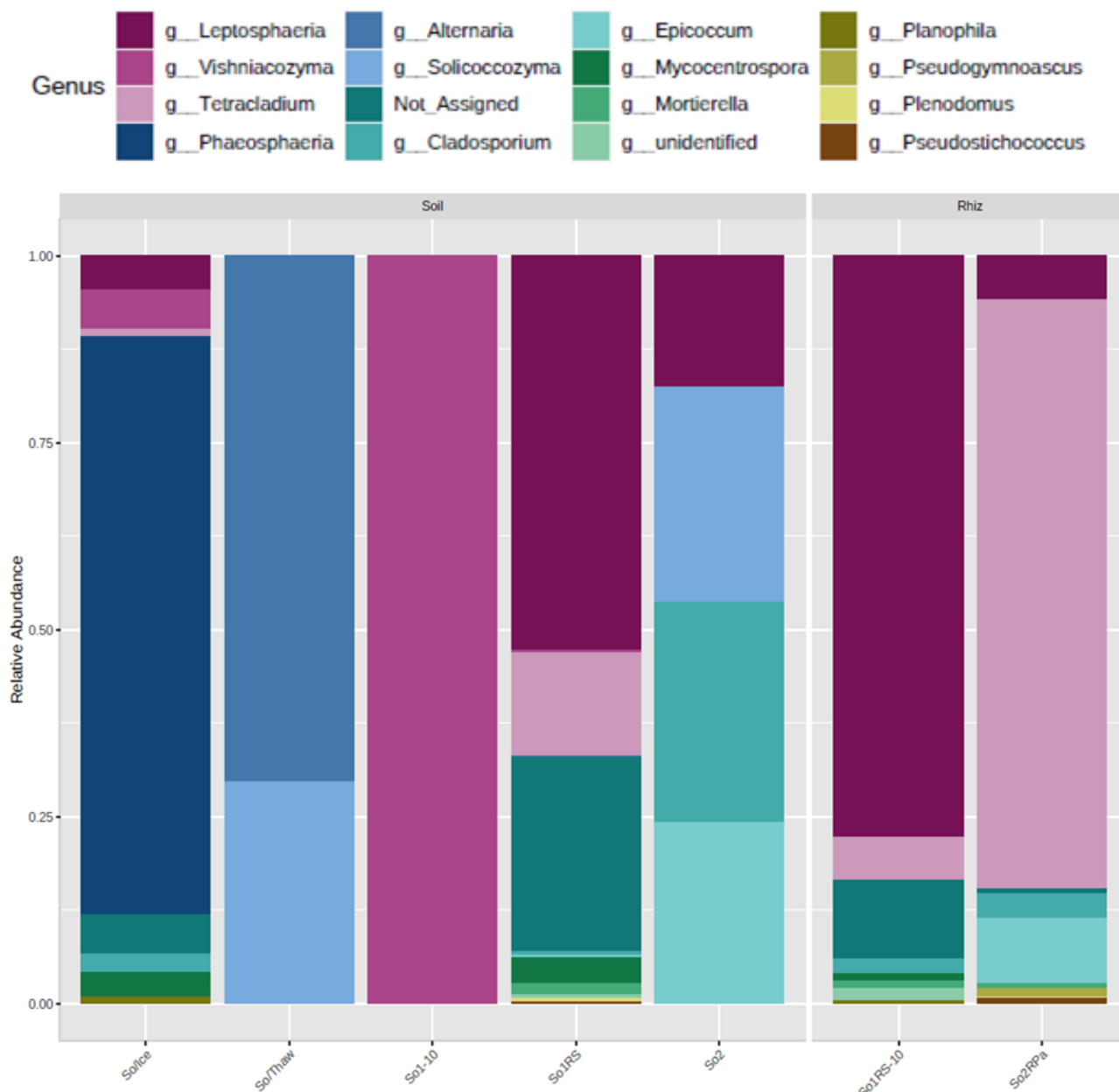


Figura 23. Istogrammi di abbondanza delle comunità fungine a livello di genere visualizzati in forma di abbondanze relative cumulate in percentuale.

Il suolo presso la pozza proglaciale e senza vegetazione, campionato a 10 cm è invece dominato da *Vishniacozyma*, un genere di cui esiste una specie psicrofila associata a ghiacciai in fase ritiro (Tsuji et al., 2019).

4.3 Humipedon

I rilievi pedologici eseguiti nel circo glaciale hanno rivelato una condizione pedologica embrionale. I suoli riscontrati sono attribuibili all'ordine degli Entisol, secondo la classificazione tassonomica del suolo USDA (ST) sviluppata dal Dipartimento dell'agricoltura degli Stati Uniti, altrimenti riconducibili alla categoria dei Leptosol secondo la classificazione World Reference Base for Soil Resources della FAO.

Gli Entisols sono identificati come suoli molto giovani, poco evoluti, senza caratteri ben espressi (Ent, dal latino *recens*, recente) con orizzonti debolmente definiti o assenti, e comprendono un'ampia gamma di caratteristiche, in quanto si formano su pendii ripidi da materiale progenitore colluviale e nelle pianure alluvionali da materiale progenitore alluvionale (Mary Beth Adams et al., 2019). In questa particolare categoria di suoli le prove della sintesi e dell'alterazione dei minerali sono minime. Il contenuto in terra fine è solitamente inferiore al 30 %. Si sono quindi verificati sicuramente alcuni cambiamenti relativi al materiale madre che consentono la presenza esigua di un sub-strato favorevole alla germinazione dei semi delle piante. Piante che con la loro attività, soprattutto ipogea, permettono un'evoluzione delle condizioni pedologiche, verso sistemi più complessi e strutturati. L'espressione morfologica dell'attività biologica di vegetali e microrganismi è rappresentata dall'orizzonte organo-minerale che costituisce quindi il prodotto della crescita vegetale e della decomposizione di sostanze biologiche ad opera soprattutto di funghi e batteri. Si tratta di un orizzonte caratterizzato da una mescolanza, più o meno intima, tra la sostanza organica e la sostanza minerale. La sostanza organica conferisce una colorazione più scura, tanto più marcata quanto più essa è abbondante rispetto alla sostanza minerale. Passando ora alla presentazione dei rilievi è bene premettere che il suolo può essere suddiviso in tre strati ciascuno dei quali può essere descritto e classificato indipendentemente dagli altri: Humipedon, Copedon e Lithopedon (Zanella et al., 2018a). Il primo dipende principalmente dalla fonte di materia organica e dagli animali e microrganismi che vivono nel suolo. L'Humipedon è quindi la porzione di suolo più superficiale composta da orizzonti organici (OL, OF e OH) e orizzonti organo-minerali (A) (Zanella et al., 2018b). Inoltre è doveroso sottolineare come accanto ai tipici topsoils esistono altri humipedons più

discreti, come quelli indagati con il presente studio, generati dall'interazione della materia minerale con microrganismi, funghi e piccole piante (alghe, licheni e muschi) (Zanella et al., 2018c). Abbiamo quindi provato a classificare situazioni ancora poco conosciute e lontane dall'essere caratterizzate su basi scientifiche, nella convinzione che dare nomi alle cose può aiutare a capirle meglio. Possiamo ricondurre gli humipeton esplorati a nuove forme di para humus, da aggiungere, eventualmente, a quelli già pubblicati (Zanella et al., 2022).

Prima di presentare i risultati dei rilievi pedologici eseguiti nei diversi siti, viene brevemente presentato l'humipeton di ghiacciaio.

Anche la neve è abitata da microrganismi e a partire dal momento in cui gli effetti di questi sul substrato si vedono ad occhio nudo è sensato considerare la superficie alterata del manto di neve come un humipeton.

Alexandre M. Anesio, Stefanie Lutz, Nathan A. M. Christmas, e Liane G. Benning hanno studiato molto bene i processi di biodegradazione della neve in un bellissimo articolo intitolato "The microbiome of glaciers and ice sheets" (2017). In una figura illustrano le diverse fasi di evoluzione del manto nevoso (Figura 24). Anche nei ghiacciai Agola e Pratofiorito si possono riconoscere le medesime fasi.

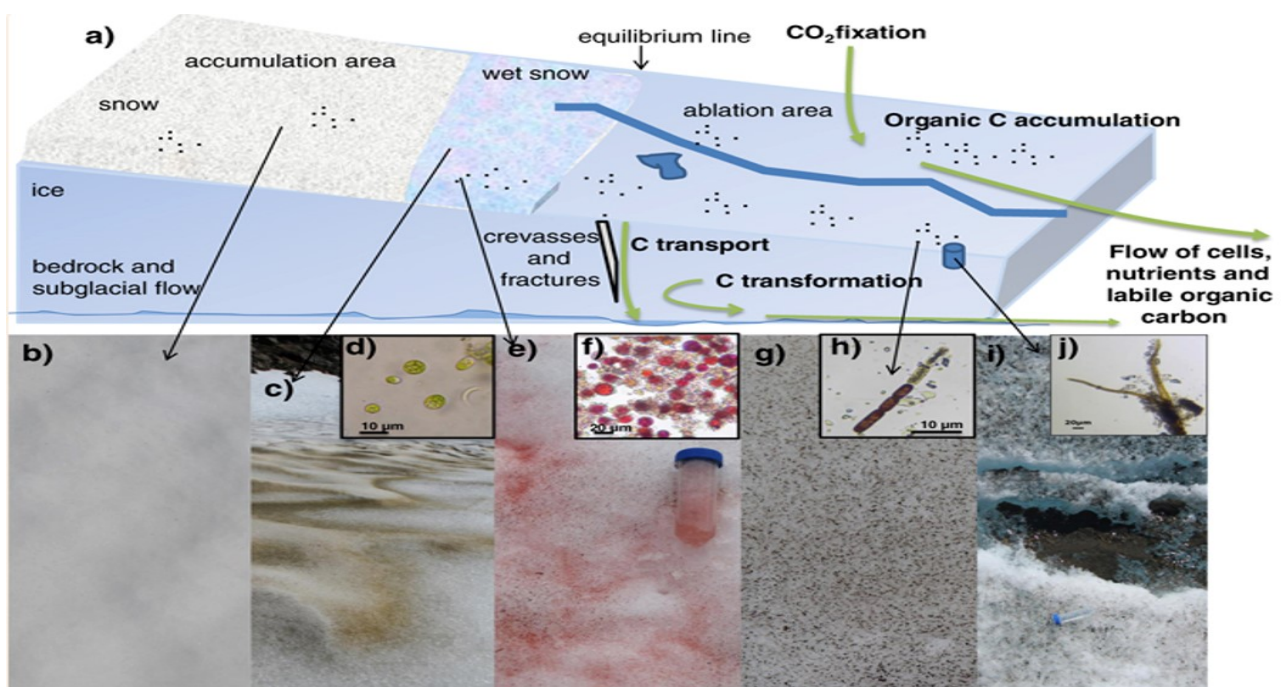


Figura 24. a) fasi di evoluzione del manto nevoso. b) neve bianca nella zona di accumulo. c-e) inizio della trasformazione del manto nevoso, la presenza di acqua libera favorisce la presenza di produttori primari come le alghe. g) neve punteggiata di S.O. j) buco di crioconite.

Tramite alcune fotografie abbiamo cercato di individuare queste fasi di degradazione del manto nevoso sui ghiacciai d'Agola e di Pratofiorito e di assegnare loro un nome per le diverse forme di humus. In figura 25 si notano le aree rosate dei due ghiacciai che abbiamo visitato. Sebbene la colorazione sia in larga parte dovuta alla presenza di sabbia, la trasformazione del manto nevoso è in atto, si presenta infatti molto umido e pesante; condizione favorevole per lo sviluppo di produttori primari in superficie, come le alghe.



Figura 25. Manto nevoso "marcio". Sinistra: Agola. Destra: Pratofiorito

Nelle due fotografie si nota bene le aree rosa, le quali occupano più della metà della superficie innevata. Anche la parte alta del ghiacciaio sembra essere in questa fase di neve bagnata. Solo una ristretta parte centrale, di raccolta, del ghiacciaio dell'Agola (sinistra) sembra ancora nella fase di neve poco sporca. La rimanente superficie potrebbe essere assegnata alla fase di neve con accumulazione di sostanza organica.

Osservando più attentamente il manto nevoso, soprattutto nell'area di fusione, dove la neve si presenta fradicia, si può notare la fase di "neve sporca". La sostanza organica è abbondantemente distribuita sulla superficie, andando a costituire una sorta di sottile orizzonte organico. La derivazione di questo materiale è duplice: insetti, come collemboli e larve di ditteri rappresentano la fonte endogena, mentre come fonte esogena troviamo residui organici di diversa natura giunti soprattutto per azione del vento.



Figura 26. Differenti vedute del manto nevoso "sporco". Si può apprezzare la "pioggia" di sostanza organica che punteggia la neve. Si tratta di frammenti organici di varia natura.

Desideriamo creare un nuovo sistema di humus che chiameremo “Nevio”.

Caratteri diagnostici: sistema di humus che si genera nella neve, dovuto a microrganismi e ai cambiamenti fisici e chimici nella neve durante il processo di disgelo. I processi di sviluppo e di riproduzione di questi microrganismi cambiano con il tempo dal momento di deposizione della neve fino al completo disgelo. La neve inizialmente bianca, diventa giallastra o rosata, poi si copre di particelle sostanza organica, di insetti morti. In un ghiacciaio, la sostanza organica si muove dentro lo spessore di questo e finisce sul fondo nella parte più a valle del ghiacciaio in movimento. I caratteri diagnostici sono il colore della neve e la presenza di sostanza organica.

Considerazioni dinamiche: Questi humipeton possono aiutare a descrivere la superficie innevata di un ghiacciaio e a capire la dinamica del processo di ritiro del ghiacciaio.

Queste forme di humus del sistema Nevio potrebbero essere chiamate:

1. Ininiveo (da Ini = iniziale; niveo = del sistema niveo)
2. Chrominiveo (da chroma = colore, per i colori rosa e giallo della neve marcia; niveo = del sistema niveo)
3. Euniveo (da Eu = tipico; humi = humus, per la sostanza organica depositata sulla neve; niveo = del sistema niveo)
4. Huminiveo (da humi = humus, per lo strato di sostanza organica sul fondo del ghiacciaio; niveo = del sistema niveo)

Passiamo ora a presentare i risultati dei rilievi pedologici eseguiti nell'area periglaciale. Nei micrositi di ghiaione privi di vegetazione il suolo si presenta come un profondo strato minerale costituito da sabbia e materiale detritico di diverse dimensioni coperti da una patina argillosa. Ad occhio nudo, non si riconosce nessun orizzonte organo-minerale. In altre situazioni di più avanzata pedogenesi, la presenza di specie erbacee, seppur molto discontinua lungo la superficie, permette la formazione di un vero orizzonte organo-minerale nel quale la mescolanza fra le due frazioni, organica e minerale, è evidente ed equilibrata. Lo strato si presenta di colorazione uniforme e piuttosto scura in superficie, a testimonianza della presenza di sostanza organica, anche se non ci sono delle piante in superficie. La frazione minerale costituita principalmente da argille, e probabilmente un maggior contenuto d'acqua trattenuta nei grumi organo-minerali, conferisce un maggior peso all'orizzonte organo-minerale rispetto al resto. Vi sono quindi alcuni profili che mostrano un seppur limitato orizzonte organico superficiale, strettamente legato alla lettiera e alle radici delle poche specie erbacee presenti, e che appoggia su un orizzonte A molto minerale composto di micro-grumi organo-minerali nei quali l'intima incorporazione del materiale organico con quello minerale è percepibile a occhio nudo. La struttura grumosa tipica dell'orizzonte A è evidente anche se poco espressa e limitata al volume di suolo di contatto tra la parte superficiale esplorata dalle radici e la sottostante porzione minerale.

In altre situazioni particolari si nota la presenza di consistenti frazioni di materiale organico che si accumula al margine del ghiacciaio e che genera un orizzonte simile a quelli di ambienti torbosi, ovvero di sostanza organica che si trasforma in condizioni di ristagno periodico di acqua, dove batteri anaerobi e aerobi si succedono sul substrato organico in decomposizione. Le diverse condizioni pedologiche riscontrate nei siti d'Agola e di Pratofiorito hanno messo in luce la presenza di particolari forme di para-humus che proponiamo di raggruppare in un sistema di humus che chiameremo "Litho" (da Lithos, roccia).

Nel settore d'Agola il primo rilevamento, ha riguardato una porzione di ghiaione detritico nei pressi di un laghetto proglaciale. Il sito, dove sono stati prelevati i campioni denominati So1-10 e So1-50 presentava esclusivamente detrito e lo scavo ha interessato una profondità di circa 50 cm. Il suolo riconducibile alla categoria dei Leptosol presentava, subito al di sotto della superficie, uno strato di circa 20 cm di colore leggermente più scuro, sintomo di una esigua presenza di sostanza organica, appena percepibile ad occhio nudo, per poi tornare a presentare una colorazione più chiara tipica degli orizzonti minerali. L'humipedon si presenta quindi con un orizzonte A organo-minerale visibile all'occhio nudo, composto di polveri e grumi grigi di dimensione inferiore al mm misti a materiale più grossolano, più scuro in superficie e che diventa gradualmente chiaro come la roccia madre in profondità. Sopra l'orizzonte A, il profilo non presenta un orizzonte organico. Proponiamo di denominare questa forma di humus Eulitho (da Eu = tipico).



Figura 27. Destra: profilo di suolo nei pressi della pozza proglaciale. Qui sono stati prelevati i campioni So1-10 e So1-50. Sinistra: profilo di suolo nei pressi della pozza che presenta le medesime caratteristiche. Sistema di humus: Litho. Forma di humus: Eulitho.

Sempre nei pressi del laghetto proglaciale sono stati prelevati altri due campioni, denominati rispettivamente So1RS e So1RS-10. In questo caso la presenza di vegetazione permette la formazione di un esiguo orizzonte organico costituito soprattutto da residui vegetali in via di trasformazione come foglie radici ed essudati radicali. La limitatezza di questa frazione organica, tuttavia, non permette la distinzione dei vari sottorizzonti (OL, OF, OH). Il suolo è riconducibile sempre alla tipologia dei Leptosol. A differenza del precedente sito, tuttavia, la componente organica è meglio visibile e riconoscibile e l'orizzonte organo-minerale che ne deriva dimostra una discreta struttura grumosa, sintomo di una moderata mescolanza tra le diversi componenti del suolo. L'humipedon presenta quindi in superficie un orizzonte organico (OL+OF+OH+radici) formato da resti minuti di pianta intrappolati tra i fusti delle piante, coperti e protetti dalla pianta stessa. Sotto questo strato si trova un orizzonte A simile a quello di un Eulitho. Proponiamo di chiamare questa forma di humus Humilitho.

Figura 28. Suolo rizosferico presente nei pressi della pozza proglaciale al di sotto di una pianta di Sedum sp. Qui sono stati prelevati i campioni So1RS e So1RS-10. Sistema di humus: Litho. Forma di humus: Humilitho.





Figura 29. Profili di suoli riscontrati sul crinale della massiccia morena glaciale che scende verso la Val Nardis. Qui sono stati prelevati i campioni So2-RPa e So2. Sistema di humus: Litho. Forma di humus: Inilitho.

I campioni denominati So2-RPa e So2 sono invece stati prelevati sulla sommità di una massiccia morena glaciale che dal circo glaciale scende in direzione della valle di Nardis. La quota è di circa 300 metri inferiore rispetto al precedente sito. Anche qui i suoli sono riconducibili alla tipologia dei Leptosol, ma a differenza del caso precedente il profilo di suolo presente al di sotto della pianta di *Papaver alpinum*, dove è stato raccolto il campione denominato So2-RPa, non mostra alcun cambio di colorazione percepibile ad occhio nudo. Lo strato organico è quindi assente e l'orizzonte di tipo A non è distinguibile. Il suolo si presenta del tutto simile alla condizione priva di vegetazione riscontrabile nel caso del campione So2, eseguito a breve distanza e caratterizzato da sola presenza di detrito in superficie.

Si tratta quindi di un humipedon senza orizzonte A visibile, che appare all'occhio nudo come costituito essenzialmente da materiale minerale più o meno frantumato (Figura 30). Sappiamo che in realtà è pieno di microrganismi invisibili che hanno già iniziato a formare l'humipedon, come rivelano anche le analisi di sequenziamento genetico. Proponiamo pertanto di chiamare questa forma di humus Inilitho (da Ini = Iniziale).



Figura 30. Particolare formazione umo-minerale presente al limitare del ghiacciaio di Pratofiorito. Sistema di humus: Litho. Forma di humus: Histolitho.

Nel settore di Pratofiorito in entrambi i siti di prelievo dei campioni è stata riscontrata una situazione particolare. Trattasi di una massa di materiale minerale molto fine, misto a sostanza organica probabilmente trasportato e poi accumulato dall'acqua di fusione del ghiacciaio. Si tratta quindi di un substrato soggetto a condizioni di sommersione periodica, dove, a seguito del ritiro del ghiacciaio, possono insediarsi più favorevolmente le prime comunità vegetali come ad esempio le briofite, non avendo particolari apparati radicali. Il processo di genesi di queste particolari frazioni di suolo potrebbe essere ricondotto a quello che sta alla base della formazione dei Fluvisol. L'humipledon si presenta quindi simile a micro-torbe, definiti da un singolo orizzonte grigio, liquido e denso e che prende la forma del recipiente roccioso in cui si accumula. Proponiamo di chiamare questa forma di humus Histolitho (da Histos = tessuto, utilizzato per definire suoli torbosi).

Una situazione particolare è stata riscontrata scavando sul bordo del ghiacciaio, dove è stata trovata della sostanza organica imprigionata ancora nel ghiaccio. Con la fusione del ghiacciaio, questa sostanza organica fuoriesce per accumularsi nelle fessure o nei micro impluvi della roccia e originare la forma di humus descritta precedentemente col nome di Histolitho. Proponiamo di chiamare invece col nome di Flownevio questa forma di humus, riconducibile al sistema Niveo, caratterizzata da sostanza organica in transito sul fondo del ghiacciaio.



Figura 31. Sistema di humus: Niveo. Forma di humus: huminevio. Situazione riscontrata al bordo del ghiacciaio (destra) e sotto la neve (sinistra). Sostanza organica sepolta e imprigionata nel ghiaccio.

Riassumendo, in questi suoli superficiali o (Entisols USDA o Leptosols WRB), che in alcuni casi possono essere idromorfi, si formano degli humipedon di ghiaione detritico specifici che proponiamo di includere in un nuovo sistema di humus chiamato "Litho" (da Lithos, roccia).

Caratteri diagnostici: Sistema di humus di alta montagna, al limite superiore della vegetazione e sopra tale limite. Si tratta di detriti rocciosi nudi o con vegetazione molto sparsa e rada, abitati da microrganismi, e da piccoli animali del suolo. Questi humipedon si distinguono dal sistema Crusto perché non si vedono croste di licheni sulla roccia in posto. Il detrito appare nudo ed è soggetto a movimenti con continuo apporto continuo dalla parte più alta del pendio. Nella parte superficiale percorsa da radici, l'humipedon può presentare una colorazione più scura su pochi centimetri di profondità, segno di presenza di sostanza organica; a volte, proprio sotto le piante che tendono a formare dei cuscinetti, si genera anche un orizzonte organico di residui vegetali imprigionati tra i gambi della pianta.

Considerazioni dinamiche: Ecosistema pioniera di alta quota, tipico delle primissime fasi di sviluppo degli humipedon su ghiaioni e altre colate detritiche. Quando sotto la roccia compaiono dei lombrichi epigei, il deposito è più stabile, anche la copertura vegetale è più importante e si passa in sistemi Bryo o Rhizo.

Di questo nuovo sistema di humus abbiamo individuato quattro diverse forme di humus riportando a titolo esplicativo foto dei diversi rilievi eseguiti.

1. Inilitho (da Ini = Iniziale).
2. Eulitho (da Eu = tipico).
3. Humilitho (da humi=humus).
4. Histolitho (da Histos = tessuto, utilizzato per definire suoli torbosi).

5. Discussione

L'area oggetto di studio, compresa tra i 2300 e i 2700 m s.l.m. rappresenta un ambiente alpino del tutto particolare e sicuramente fra i più sensibili al cambiamento del clima. La prossimità al ghiacciaio fa sì che la si possa meglio identificare con il termine di zona periglaciale. Questo termine fu introdotto per la prima volta per descrivere le condizioni climatiche e geomorfiche periferiche alle calotte glaciali del tardo Pleistocene. Attualmente non esiste una definizione universalmente accettata e pertanto potremmo intendere, con tale vocabolo, le zone poste ai margini di un ghiacciaio, che sono state recentemente (decine di anni) esposte ad attività atmosferiche e biologiche, mantenendo però una stretta connessione con il ghiacciaio e ancora influenzate da un'intensa azione di gelo/disgelo. Il ghiacciaio è un bioma unico, dove i microrganismi stabiliscono una catena trofica verticale, dai fotosintetizzatori procarioti ed eucarioti superficiali negli strati superiori illuminati, agli eterotrofi confinati nella parte interna e profonda. L'elevato tasso di fusione che stanno sperimentando i ghiacciai dell'arco alpino sta però riducendo sempre più il loro areale. Nel caso specifico della catena d'Ambiez, le vedrette sono destinate a scomparire in meno di un paio di decenni. Insieme ai ghiacciai sono destinati a scomparire anche gli organismi psicrofili in senso stretto, "vere" specie del ghiaccio, che ben si adattano alle temperature intorno al punto di congelamento e che sopravviverebbero in luoghi più caldi solo temporaneamente, come la filamentosa *Ancylonema nordenskiöldii* (Kol, 1968). Possiamo considerare la neve glaciale un ambiente duro ma relativamente costante che ospita una comunità microbica limitata, che può essere particolarmente ben adattata al suo ambiente (Wilhelm et al., 2013). Le variazioni di temperatura e precipitazioni, hanno però il potenziale per cambiare la composizione della comunità microbica e ostacolare la presenza di specie che sono ben adattate ai vincoli di neve glaciale (psicrofile). Il suolo glaciale, ovvero il suolo in prossimità del ghiacciaio, invece, è più dinamico in termini di sviluppo dell'ecosistema e potremmo dire che "soffre" con la successione primaria. La prima osservazione riguarda quindi l'imminente perdita di biomi unici come i ghiacciai e il conseguente innesco di fenomeni di colonizzazione delle nuove superfici esposte. All'interno della comunità dei viventi, alcune specie scompariranno, altre si

adatteranno e altre ancora amplieranno il proprio areale. Con il presente studio abbiamo voluto indagare il processo di successione che ormai da diversi decenni sta interessando le zone periglaciali dei ghiacciai d'Agola e di Pratofiorito.

Dall'analisi dati delle comunità batteriche emerge come la struttura delle stesse sia vincolata da condizioni ecologiche riscontrabili a livello di microambienti. Indipendentemente dalla quota infatti, riscontriamo comunità con un certo grado di affinità in funzione della sola presenza di radici. La specie vegetale inoltre, non sembra avere un ruolo decisivo nel modellare la comunità. Le condizioni ecologiche possono variare e succedersi rapidamente in un medesimo spazio centimetrico e allo stesso tempo possono presentarsi simili a distanze di centinaia di metri. Il campione So1-10 prelevato nel primo sito mostra maggiore affinità con il campione So2, prelevato circa 300 metri di dislivello più in basso, nel sito 2, rispetto a quella che mostra con il campione So1-50 prelevato 40 cm più in basso, a testimonianza dell'importanza delle condizioni micro-ambientali per il microbioma del suolo. Tale osservazione rende particolarmente arduo lo studio delle necessità ambientali ed ecologiche dei microrganismi, tuttavia, tramite i dati possiamo riconoscere l'importanza della vegetazione come fattore trainante nel foggare le comunità batteriche. Ulteriore conferma di tale tesi è la notevole biodiversità riscontrata nei campioni di suoli rizosferici. I campioni di suolo raccolti al di sotto di uno strato superficiale di vegetazione presentano mediamente 425 OTU identificate contro le 76 riscontrate in media in campioni esclusivamente detritici. Anche i valori di abbondanza sono notevolmente superiori arrivando a 127.148 contro i 4424 dei campioni privi di uno strato erbaceo. L'analisi delle abbondanze relative tramite curve di rango abbondanza ha indicato che la maggior parte delle letture nel suolo privo di piante ha mostrato più dominanza e meno OTU; vi è quindi un minor numero di unità tassonomiche operative e una abbondanza di alcune di queste che arriva al 60%. Le curve si presentano pertanto molto verticali per poi appiattirsi notevolmente mostrando un andamento riconducibile al modello teorico della serie geometrica: poche specie dominano ed occupano la maggior parte delle nicchie. L'equitabilità della comunità è bassa. Il microbioma batterico di suoli non rizosferici è quindi caratterizzato da un basso numero di specie ed è impedito nella crescita dalla limitatezza di una qualche risorsa ambientale. Potremmo supporre che sia proprio la sostanza organica a costituire il fattore limitante. Tale risorsa

viene utilizzata in maniera strettamente gerarchica e provoca povertà di specie e notevole differenza nell'abbondanza delle stesse. Considerando i siti con presenza di vegetazione è possibile osservare come il valore di abbondanza relativa massimo non supera in nessuno dei 3 campionamenti il 5,5%. Le curve rango-abbondanza mostrano infatti un andamento riconducibile al modello "Broken stick". Vi sono quindi molte specie con più o meno la stessa abbondanza. Le risorse sono distribuite in modo omogeneo comportando una ridotta dominanza. Tale modello di distribuzione delle abbondanze si trova in piccole comunità di specie molto simili. Si può ipotizzare che la sostanza organica venga condivisa più o meno equamente dalle specie costituenti la comunità batterica, le quali, di conseguenza, distribuiscono i loro valori di abbondanza in maniera decisamente più equa. La diversità di specie viene espressa tramite indici sintetici non parametrici che riassumono ricchezza specifica e evenness. Tengono quindi conto sia del numero di specie che delle abbondanze relative, sintetizzando l'informazione in un unico valore di diversità. Sulla base dei risultati, le diversità batteriche medie erano di 5,52 nel suolo con presenza di vegetazione e 2,97 nel suolo con esclusiva presenza di detrito roccioso. L'indice di diversità batterica di Shannon più elevato è del campione So2RPa, con un valore pari a 5,62, mentre il valore minore appartiene al campione So1-50 pari a 2,18. La porzione più "viva" del suolo è l'humipedon e al suo interno sembrerebbero essere gli orizzonti più superficiali ad essere interessati da una maggiore attività batterica. La porzione superficiale del suolo è quella con maggiore concentrazione di sostanza organica e dove i processi di degradazione di organismi eterotrofi sono quindi più intensi. La porzione apicale del terreno è ricca di vita, ma in questo particolare ambiente è anche maggiormente soggetta a fenomeni di alterazione dovuti a continui seppellimenti ed eventi di frana. La povertà dei suoli, la natura incoerente di ghiaioni e macereti e le acclività spesso estreme inoltre, osteggiano ulteriormente l'avvento della vegetazione. Questo fatto ostacola notevolmente la genesi del suolo che come detto è intimamente legata alla simbiosi pianta-batteri. Solo le glareofite (piante adattate alla crescita su ghiaioni e pietraie mobili), permettono l'evoluzione del suolo in quei microcrositi atti alla germinazione (elevata presenza di materiale fine come argilla). La maggior parte di queste specie presenta infatti caratteristiche atte a consentire la sopravvivenza in ambienti estremi come i ghiaioni (Thomas Peer, 1990).

Per quanto riguarda i funghi i dati fanno emergere un maggior mescolamento dei campioni di rizosfere e suoli rispetto a quanto visto per i batteri. Le comunità fungine si presentano, per quanto accorpate tra clusters, molto meno affini tra loro. Esistono anche comunità completamente differenti, situazione non riscontrata nelle comunità batteriche. Il dato è in linea con la maggiore capacità di dispersione ambientale, e conseguente rimescolamento, che le spore dei funghi possiedono rispetto alle cellule batteriche. In tutti i campioni è riscontrabile una discreta dominanza ed una mediocre ricchezza come testimoniano le curve di rango abbondanza che si presentano piuttosto ripide e con code non molto pronunciate. Anche per quanto riguarda le comunità fungine si può notare una significativa differenza in termine di ricchezza di OTU tra campioni prelevati al di sotto di specie vegetali e campioni raccolti in siti esclusivamente detritici. La dipendenza dei funghi dalla sostanza organica, essendo eterotrofi, rende d'altronde attesa una differenza di abbondanze rispetto al suolo privo di vegetazione. Al di sotto della vegetazione i funghi dominanti appartengono al phylum degli ascomiceti (Ascomycota) e la loro abbondanza è preponderante, rendendoli di fatto dominanti all'interno della comunità. Passando all'analisi di diversità, si riscontra un valore medio dell'indice di Shannon-Wenner di 2,69 nei campioni vegetati con un valore massimo di 3,33 nel campione So2RPa. Nei campioni privi di vegetazione l'indice assume il valore medio di 1,65. Interessante notare che il suolo sotto il ghiaccio del ghiacciaio Pratofiorito (So/Ice) mostra una comunità più abbondante rispetto a quella, poco percettibile dello stesso suolo nella versione deglaciata (So/Thaw). Si potrebbe ipotizzare che la comunità sotto il ghiaccio sia stata preservata in modalità ibernata e quiescente. Si osservano inoltre ulteriori casi di notevole interesse, come ad esempio il fatto che il suolo del sito di Pratofiorito ancora sotto il ghiaccio, per i funghi, diversamente da quanto osservato per i batteri, ha una composizione completamente diversa da quello adiacente e non più coperto da ghiacci. Il primo contiene infatti oltre a diversi altri taxa, una peculiare maggioranza del genere *Phaeosphaeria*, endofita e patogeno dei fusti in varie piante graminiformi (Shoemaker e Babcock, 1989). Viceversa il suolo scongelato ha scarsa diversità e presenta unicamente i generi *Alternaria* e *Solicoccozyma*.

L'aumento di temperatura, in termini pedologici, si traduce in un aumento di acqua libera, derivante da fusione, che scorrendo sulla superficie e, attraversando gli orizzonti del suolo, trasporta elementi in soluzione, tra cui molto carbonio organico derivante dall'attività dei produttori primari, che si legano alla capacità di scambio dei suoli. L'acqua di fusione, ricca in nutrienti e ossigeno, favorisce le comunità batteriche presenti nel detrito roccioso che a sua volta subisce un incremento dei tassi di alterazione e riduzione chimica e biologica, a carico dei minerali primari, per via del maggior apporto idrico.

Ripetute indagini sulla vegetazione sulle cime delle montagne in Europa, hanno documentato uno spostamento verso l'alto delle specie vegetali in risposta al riscaldamento climatico (Steinbauer et al., 2018). Negli ambienti di ghiaione si è riscontrato nel tempo un aumento significativo del numero di specie (Pelino, 2005). Tale incremento può essere sicuramente ricondotto alle condizioni climatiche più favorevoli alla formazione di suolo, determinate dal riscaldamento climatico e dall'allungamento della stagione favorevole (Chersich et al., 2015). Alcuni studi condotti su Alpi e Appennini hanno infatti rilevato che gli anni con durata limitata del manto nevoso hanno causato un aumento della temperatura del suolo e della biomassa microbica durante la stagione di crescita (M. Rogora et al., 2018). Il microbioma del suolo associato alle radici, è spesso strettamente legato funzionalmente alle piante alpine, come riscontrato in questo studio e come riportano da Peay et al., (2013) e Yashiro et al., (2016) e data l'assenza di una consistente pedofauna attiva, eccezione fatta per collemboli, larve di ditteri, nematodi, protozoi e acari possiamo considerare la genesi dell'orizzonte organo-minerale osservato nei profili di suolo studiati opera di microrganismi. Si vengono così a formare degli humipedon di ghiaione detritico specifici. In questi humipedon, appartenenti alla categoria dei Leptosol, il detrito roccioso rappresenta il materiale di partenza della pedogenesi. Lo stadio iniziale potrebbe essere ricondotto alla forma di humus Inlitho, nella quale, sebbene l'attività di microrganismi è in atto, troviamo una situazione preliminare, in cui si può supporre che la poca sostanza organica disponibile sia utilizzata da un ristretto numero di specie batteriche eterotrofe, come accade negli stadi iniziali di una successione ecologica (Ganis P., 1991). La prova morfologica di una maggiore presenza di materiale organico si ha con la formazione di un, più o

meno sviluppato, orizzonte organo-minerale (A). Sebbene non si sappia a cosa sia dovuto questo visibile incremento di frazione organica, riscontriamo nel campione So1-10, associato al rilevamento della forma di humus denominata Eulitho, una comunità batterica più ricca in numero di taxa, individui e con un valore dell'indice di Shannon maggiore rispetto al campione So2 associato all'Inilitho. Troviamo infine la forma di humus Humilitho (da humi=humus), la cui genesi è strettamente connessa alla presenza di vegetazione che oltre a fornire un apporto primario di materiale organico, ne garantisce il trattenimento, proteggendo e bloccando i propri residui e resti con i fusti e le radici. Particolare la situazione pedologica rilevata nel profilo del campionamento denominato So2RPa, dove malgrado la presenza di una specie vegetale l'humipledon presentava una forma riconducibile all'Inilitho. Tale fatto potrebbe essere imputato alla diversa morfologia della specie *Papaver alpinum*, meno idonea a trattenere i resti organici.

Altre forme di humus, svincolate dalla presenza di un sub-strato minerale, al di sopra del quale svilupparsi e con il quale interagire sono invece quelle riscontrate sulla superficie innevate dei ghiacciai. In questo ambiente alghe e cianobatteri di neve e ghiaccio sono i principali produttori primari e ingegneri dell'ecosistema. Sono responsabili dell'accumulo di materia organica sulla superficie dei ghiacciai, che a sua volta porta a feedback positivi tra la fusione e l'attività microbica. Tuttavia, anche l'apporto di materiale organico esogeno, non è trascurabile. La neve "sporca" infatti è una miniera di materia organica per tutti gli organismi eterotrofi e psicotolleranti. Indipendentemente dalla sua origine, la materia organica, sulla superficie della neve e del ghiaccio può essere trasportata attraverso il sistema englaciale fino agli ambienti subglaciali, alimentando i processi microbici sotto il ghiaccio, oppure può essere trasportata in superficie e costituire un importante meccanismo per la consegna di nutrienti agli ecosistemi a valle.

6. Conclusioni

Abbiamo studiato come le condizioni biologiche e pedologiche al limitare dei ghiacciai d'Agola e di Pratofiorito, nel sottogruppo montuoso della catena d'Ambiez, si presentano allo stato attuale. I dati provenienti dalle serie storiche derivanti dal monitoraggio dei ghiacciai nelle dolomiti di Brenta, ci informano della rapidità con la quale le vedrette si stiano ritirando. Le pendici detritiche e instabili delle vette dolomitiche rimangono così scoperte e diventano terreno di conquista per nuove comunità di viventi, mentre per altre questo significa estinzione. Lo studio delle comunità di microrganismi che abitano i suoli al limitare del ghiaccio ha portato alle seguenti conclusioni:

- I suoli della zona del ghiacciaio d'Agola presentano comunità batteriche la cui abbondanza e diversità sono fortemente influenzate dalla presenza di piante, nella cui rizosfera si concentra il massimo di presenza, abbondanza e biodiversità microbica, indicando l'effetto della vegetazione quale fattore di primaria importanza nel plasmare la composizione delle comunità batteriche.
- L'effetto della vegetazione, anche alla profondità di 10 cm al di sotto dell'apparato radicale, rende le comunità batteriche dei suoli rizosferici notevolmente diverse da quelle di adiacenti suoli non rizosferici.
- Le comunità batteriche delle rizosfere di piante diverse tendono a somigliarsi mentre quelle fungine non condividono la stessa tendenza; probabilmente per via della capacità di dispersione ambientale, e conseguente rimescolamento, che le spore dei funghi possiedono rispetto alle cellule batteriche.
- Sia i batteri che i funghi dei dintorni del ghiacciaio d'Agola presentano marcate differenze da quelli del ghiacciaio Pratofiorito.
- Nel caso del ghiacciaio Pratofiorito, mentre i batteri della zona coperta da ghiaccio e di quella in cui lo stesso si è ritirato sono piuttosto simili, i funghi mostrano comunità estremamente diverse.
- Gli studi di microbiologia di habitat glaciali basati su metodi molecolari possono rivelare importanti informazioni ai fini della comprensione sensibile e precoce dei fenomeni in corso.

Lo studio pedologico condotto tramite una analisi morfogenetica ha invece portato alle seguenti conclusioni:

- All'interno del bioma ghiacciaio proponiamo una nuova classificazione di particolari sistemi di humus, denominati para humus, presenti sulla superficie innevata. Sugeriamo di chiamare questo nuovo sistema "Niveo"
Caratteri diagnostici: sistema di humus che si genera nella neve, dovuto a microrganismi e ai cambiamenti fisici e chimici nella neve durante il processo di disgelo. Abbiamo individuato 4 possibili forme: Ininiveo - Chrominiveo – Euni-veo – Huminiveo.
- Le aree deglacciate presentano suoli riconducibili alla categoria dei Leptosol; correlati ai suoli dell'ordine degli Entisol della tassonomia statunitense. Trattasi di suoli azonali caratterizzati dalla quasi assenza di orizzonti che riflettono chiaramente i processi di formazione del suolo formati su elementi superficiali di origine geologica recente (ad es. pendii ripidi o pianure alluvionali). Si può supporre che a causa del riscaldamento globale l'area occupata da Cryosols diminuirà mentre aumenterà quella di altre tipologie come Fluvisols o Leptosol.
- In questi suoli abbiamo individuato un nuovo sistema di classificazione di para humus e quattro forme di humus, tre delle quali lungo un gradiente di formazione del suolo (Iniltho, Eulitho e Humilitho), una di ambiente torboso (Histolitho). Caratteri diagnostici: Sistema di humus di alta montagna, al limite superiore della vegetazione e sopra tale limite. Si tratta di detriti rocciosi nudi o con vegetazione molto sparsa e rada, abitati da microrganismi, e da piccoli animali del suolo.

L'aumento della temperatura potrebbe modificare la diversità e la composizione del microbioma del suolo direttamente o indirettamente attraverso la colonizzazione da parte di nuove specie più termofile e portare ad un aumento della copertura vegetale. Gli ambienti di montagna stanno diventando quindi sempre più verdi, e nuove superfici sono disponibili per la successione primaria come le sempre più estese aree de-glaciate e le aree precedentemente non vegetate.

Alcune osservazioni in merito all'evoluzione futura di aree periglaciali riguardano l'aumento dello spessore dello strato attivo del suolo, dovuto alla perdita del permafrost, che può determinare la destabilizzazione dei pendii in relazione ad un aumento degli eventi piovosi intensi, causando gravi fenomeni di erosione idrica, o addirittura episodi di frana e colate detritiche. In risposta al cambiamento ambientale, il limite del bosco avanza verso l'alto e quindi il rischio derivante da questi fenomeni geologici potrebbe essere in parte arginato. Tuttavia l'avanzata di specie arboree sottrae spazio e areale ai tappeti erbosi alpini. Questi particolari habitat, dove nessun albero e solo qualche arbusto riesce a resistere al clima estremo, potrebbero subire gravi riduzioni in termini di superficie. Le alte montagne in Europa contengono il 20% della flora nativa del continente (Vare et al., 2003) e sono centri di diversità vegetale, ospitando diverse specie endemiche. Il cambiamento climatico è considerato una delle principali minacce alla diversità vegetale al di sopra del limite del bosco.

È tuttavia fondamentale sottolineare come sia difficile prevedere uno scenario futuro perché tutte le diverse componenti ambientali hanno una risposta peculiare al clima e cambiano con un tempo di reazione specifico. Il tempo è quindi un fattore cruciale, ma al momento non ci sono dati bibliografici sufficienti per dare un tempo di reazione per ogni variabile ambientale e possiamo solo formulare ipotesi.

7. Bibliografia e sitografia

Anesio, A.M., Lutz, S., Christmas, N.A. and Benning, L.G., 2017. The microbiome of glaciers and ice sheets. *npj Biofilms and Microbiomes*, 3(1), pp.1-11.

Arendt, A., Bolch, T., Cogley, J.G., Gardner, A., Hagen, J.O., Hock, R., Kaser, G., Pfeffer, W.T., Moholdt, G., Paul, F. and Radic, V., 2012. Randolph Glacier Inventory [v2. 0]: A Dataset of Global Glacier Outlines. Global Land Ice Measurements from Space.

Busse, M., Giardina, C., Morris, D. and Page-Dumroese, D., 2019. *Global Change and Forest Soils: Cultivating Stewardship of a Finite Natural Resource*. Elsevier.

Chersich, S., Rejšek, K., Vranová, V., Bordoni, M. and Meisina, C., 2015. Climate change impacts on the Alpine ecosystem: an overview with focus on the soil. *Journal of forest science*, 61(11), pp.496-514.

Christmas, N.A., Anesio, A.M. and Sánchez-Baracaldo, P., 2015. Multiple adaptations to polar and alpine environments within cyanobacteria: a phylogenomic and Bayesian approach. *Frontiers in microbiology*, 6, p.1070.

D'Amico, M.E., 2009. *Soil ecology and pedogenesis on ophiolitic materials in the western Alps (Mont Avic Natural Park, North-western Italy): soil properties and their relationships with substrate, vegetation and biological activity* (Doctoral dissertation, Università degli Studi di Milano-Bicocca).

Florenzano G., 1983. *Fondamenti di microbiologia del terreno*. IV ristampa. REDA, Roma.

G. Buscaini, E. Castiglioni, 1949. *Guida dei monti d'Italia. Dolomiti di Brenta*. TCI e CAI, Milano.

Ganis, P., 1991. La diversità specifica nelle comunità ecologiche: concetti, metodi e programmi di calcolo. Quaderni del Gruppo Elaborazione Automatica Dati Ecologia Quantitativa Dipartimento di Biologia Università di Trieste C.E.T.A. (International Center for Theoretical and Applied Ecology).

Garcia-Lopez, E. and Cid, C., 2017. The role of microbial ecology in glacier retreat. *Glaciers Evolution in a Changing World*.

Garofalo, C., Osimani, A., Milanović, V., Aquilanti, L., De Filippis, F., Stellato, G., Di Mauro, S., Turchetti, B., Buzzini, P., Ercolini, D. and Clementi, F., 2015. Bacteria and yeast microbiota in milk kefir grains from different Italian regions. *Food microbiology*, 49, pp.123-133.

Giordano A., 1999. Pedologia. Utet, Torino.

Gobat J. M., Aragno M. e W. Matthey, 1998. Le sol vivant: bases de pédologie, biologie des sols. Presses Polytechniques et Universitaire Romandes, Lausanne.

Heywood, Vernon Hilton, and Robert Tony Watson, 1995. *Global biodiversity assessment*. Vol. 1140. Cambridge: Cambridge university press.

Hoshino, T. and Matsumoto, N., 2012. Cryophilic fungi to denote fungi in the cryosphere. *Fungal biology reviews*, 26(2-3), pp.102-105.

Ibelings, B.W., De Bruin, A., Kagami, M., Rijkeboer, M., Brehm, M. and Donk, E.V., 2004. Host parasite interactions between freshwater phytoplankton and chytrid fungi (chytridiomycota) 1. *Journal of Phycology*, 40(3), pp.437-453.

IPCC, Sixth Assessment Report, 2021.

- Janardhanan, A., 2019. Glacier metamorphosis. Climate change and melting Alps.
- Kol, E.R.Z.S.É.B.E.T., 1968. Algae from the Antarctica. *Ann Hist-Nat Mus Nat Hung*, 60, pp.71-77.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P. and Rossi, J.P., 2006. Soil invertebrates and ecosystem services. *European journal of soil biology*, 42, pp. S3-S15.
- Lazar, A., Mushinski, R.M. and Bending, G.D., 2022. Landscape scale ecology of *Tetracladium* spp. fungal root endophytes. *bioRxiv*
- Lutz, S., Anesio, A.M., Edwards, A. and Benning, L.G., 2017. Linking microbial diversity and functionality of arctic glacial surface habitats. *Environmental microbiology*, 19(2), pp.551-565.
- Lutz, S., Anesio, A.M., Jorge Villar, S.E. and Benning, L.G., 2014. Variations of algal communities cause darkening of a Greenland glacier. *FEMS Microbiology Ecology*, 89(2), pp.402-414.
- Lutz, S., Anesio, A.M., Raiswell, R., Edwards, A., Newton, R.J., Gill, F. and Benning, L.G., 2016. The biogeography of red snow microbiomes and their role in melting arctic glaciers. *Nature communications*, 7(1), pp.1-9.
- MacArthur, R.H., 1957. On the relative abundance of bird species. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 43(3), pp.293-295.
- Musilova, M., Tranter, M., Bamber, J.L., Takeuchi, N. and Anesio, A.M., 2016. Experimental evidence that microbial activity lowers the albedo of glaciers. *Geochem. Perspect. Lett*, 2, pp.106-116.

Niederberger, T.D., McDonald, I.R., Hacker, A.L., Soo, R.M., Barrett, J.E., Wall, D.H. and Cary, S.C., 2008. Microbial community composition in soils of Northern Victoria Land, Antarctica. *Environmental microbiology*, 10(7), pp.1713-1724.

Nigrelli, G., Lucchesi, S., Bertotto, S., Fioraso, G. and Chiarle, M., 2015. Climate variability and Alpine glaciers evolution in Northwestern Italy from the Little Ice Age to the 2010s. *Theoretical and Applied Climatology*, 122(3), pp.595-608.

Quantin, P. e Lorenzoni, P., 1992. Disgregazione della leucite in minerali argillosi nelle tefriti del vulcano di Vico. *Minatore. Petrogr. Acta*, 35 (A), pp.289-296.

Rogora, M., Frate, L., Carranza, M.L., Freppaz, M., Stanisci, A., Bertani, I., Bottarin, R., Brambilla, A., Canullo, R., Carbognani, M. and Cerrato, C., 2018. Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines. *Science of the total environment*, 624, pp.1429-1442.

Routledge, R.D., 1977. On Whittaker's components of diversity. *Ecology*, 58(5), pp.1120-1127.

Russell, N. J. Cold adaptation of microorganisms, 1990. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* 326.1237.

Seppi, R. I ghiacciai alpini. Evoluzione in relazione al clima che cambia. Corso di aggiornamento a.s. 2007-2008. Dipartimento di scienze della Terra – Università di Pavia. Museo Tridentino di Scienze Naturali. Comitato Glaciologico Trentino SAT.

Shoemaker, R.A. and Babcock, C.E., 1989. Phaeosphaeria. *Canadian Journal of Botany*, 67(5), pp.1500-1599.

Spinedi, Fosco, Giovanni Kappenberger, Mattia Soldati, and Gabriele Corti, 2017. Cambiamenti Climatici: Conseguenze sul ritiro dei ghiacciai mondiali e Ticinesi.

Sprague, S.J., Watt, M., Kirkegaard, J.A. and Howlett, B.J., 2007. Pathways of infection of *Brassica napus* roots by *Leptosphaeria maculans*. *New Phytologist*, 176(1), pp.211-222.

Stanisci, A., Pelino, G. and Blasi, C., 2005. Vascular plant diversity and climate change in the alpine belt of the central Apennines (Italy). *Biodiversity & Conservation*, 14(6), pp.1301-1318.

Steinbauer, M.J., Grytnes, J.A., Jurasinski, G., Kulonen, A., Lenoir, J., Pauli, H., Rixen, C., Winkler, M., Bardy-Durchhalter, M., Barni, E. and Bjorkman, A.D., 2018. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature*, 556(7700), pp.231-234.

Swift, Michael John, Oliver W. Heal, Jonathan Michael Anderson, and J. M. Anderson, 1979. *Decomposition in terrestrial ecosystems*. Vol. 5. Univ of California Press.

Talbot, J.M., Bruns, T.D., Smith, D.P., Branco, S., Glassman, S.I., Erlandson, S., Vilgalys, R. and Peay, K.G., 2013. Independent roles of ectomycorrhizal and saprotrophic communities in soil organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 57, pp.282-291.

Thomas Peer, 1990. Biotopi in Alto Adige – La flora. Seconda edizione, casa editrice Athesia S.a r.l., Bolzano.

Tsuji, M., Tanabe, Y., Vincent, W.F. and Uchida, M., 2019. *Vishniacozyma ellesmerensis* sp. nov., a psychrophilic yeast isolated from a retreating glacier in the Canadian High Arctic. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 69(3), pp.696-700.

Väre, H., Lampinen, R., Humphries, C. and Williams, P., 2003. Taxonomic diversity of vascular plants in the European alpine areas. In *Alpine biodiversity in Europe* (pp. 133-148). Springer, Berlin, Heidelberg.

Vishniac, H.S., 2006. Yeast biodiversity in the Antarctic. In *Biodiversity and ecophysiology of yeasts* (pp. 419-440). Springer, Berlin, Heidelberg.

Wall, D.H. and Virginia, R.A., 1999. Controls on soil biodiversity: insights from extreme environments. *Applied Soil Ecology*, 13(2), pp.137-150.

Whittaker, R.H., 1960. Vegetation of the Siskiyou mountains, Oregon and California. *Ecological monographs*, 30(3), pp.279-338.

Wilhelm, L., Singer, G.A., Fasching, C., Battin, T.J. and Besemer, K., 2013. Microbial biodiversity in glacier-fed streams. *The ISME journal*, 7(8), pp.1651-1660.

Yashiro, E., Pinto-Figueroa, E., Buri, A., Spangenberg, J.E., Adatte, T., Niculita-Hirzel, H., Guisan, A. and van der Meer, J.R., 2016. Local environmental factors drive divergent grassland soil bacterial communities in the western Swiss Alps. *Applied and environmental microbiology*, 82(21), pp.6303-6316.

Zanella A., Ponge, J.F., Fritz, I., Pietrasiak, N., Matteodo, M., Nadporozhskaya, M., Juilleret, J., Tatti, D., Le Bayon, R.C., Rothschild, L. and Mancinelli, R., 2018. Humusica 2, article 13: Para humus systems and forms. *Applied Soil Ecology*, 122, pp.181-199.

Zanella A., Tomasi M., De Siena C., Frizzera L., Jabiol B., Nicolini G., 2001. Humus forestali. Manuale di ecologia per il riconoscimento e l'interpretazione – applicazione alle faggete-. Tipografia Esperia srl, Spini di Gardolo (TN).

Zanella, A. *et al.* A Standardized Morpho-Functional Classification of the Planet's Humipedons. *Soil Systems* 6, 59-59 (2022).

Zanella, A. *et al.* Humusica 1, article 1: Essential bases – Vocabulary. *Applied Soil Ecology* 122, 10-21 (2018b).

Zanella, A. *et al.* Humusica 2, article 13: Para humus systems and forms. *Applied Soil Ecology* **122**, 181-199 (2018c).

Zanella, A. *et al.* Humusica 2, article 19: Techno humus systems and global change–conservation agriculture and 4/1000 proposal. *Applied Soil Ecology* **122**, 271-296 (2018a).

Sitografia

Archivio punti d'interesse "POI", sito ufficiale Parco Naturale Adamello Brenta, <https://www.pnab.it/archivio-punti-di-interesse-poi/>

MicrobiomeAnalyst (<https://www.microbiomeanalyst.ca/>)

SHAMAN (<https://shaman.pasteur.fr>)

Past (<https://www.nhm.uio.no/english/research/resources/past/>).