



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI ED AMBIENTALI

ACIDI GRASSI FOSFOLIPIDICI (PLFA) IN SUOLI  
FORESTALI DI DIFFERENTI ETÀ  
DELL'ISLANDA.

*PHOSPHOLIPIDS FATTY ACIDS (PLFA) IN SOILS UNDER  
FOREST OF DIFFERENT AGES OF ICELAND.*

TIPO TESI: sperimentale

Studente:  
FRANCESCO FIORANI

Relatore:  
PROF.SSA. STEFANIA COCCO

Correlatore:  
PROF. GIUSEPPE CORTI  
DOTT.SSA VALERIA CARDELLI

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

1	INTRODUZIONE	1
1.1	ISLANDA	1
1.1.1	INQUADRAMENTO GENERALE DELLE CONDIZIONI CLIMATICHE, PEDOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE ISLANDESI	1
1.1.2	STORIA TERRITORIALE	7
1.1.3	SUOLI ISLANDESI	10
1.1.4	CARATTERISTICHE DEI SUOLI ISLANDESI	14
1.2	MICROORGANISMI DEL SUOLO	19
1.2.1	CLASSIFICAZIONE	19
1.2.2	METODI DI ANALISI	21
2	SCOPO DELLA TESI	24
3	MATERIALI E METODI	25
3.1	AREA DI STUDIO	25
3.2	STATO DELL'ARTE	27
3.2.1	PREPARAZIONE DEI CAMPIONI E ANALISI	27
3.2.2	ANALISI FISICHE	28
3.2.1	ANALISI CHIMICHE	31
3.3	ANALISI DI LABORATORIO	35
3.3.1	ANALISI DEL VETRO	35
3.3.2	DETERMINAZIONE DELLE ATTIVITÀ ENZIMATICHE	36
3.3.3	DETERMINAZIONE DEI FOSFOLIPIDI DI MEMBRANA	38
3.4	ANALISI STATISTICA DEI DATI	39
4	RISULTATI E DISCUSSIONI	40
4.1	RISULTATI	40
4.1.1	ANALISI MORFOLOGICA	40
4.1.2	RISULTATI ANALISI VETRO	45
4.1.3	RISULTATI ANALISI POTENZIALITÀ ENZIMATICA	46

4.1.4	RISULTATI EL-FAME	51
4.1	DISCUSSIONE RISULTATI	55
4.1.1	ANALISI MORFOLOGICA	55
4.1.2	VETRO	58
4.1.1	ATTIVITÀ ENZIMATICA	59
4.1.2	EL-FAME	61
5	CONCLUSIONI	63
6	BIBLIOGRAFIA	64
7	INDICE DELLE FIGURE E TABELLE	68
7.1	FIGURE	68
7.2	TABELLE	69

# 1 INTRODUZIONE

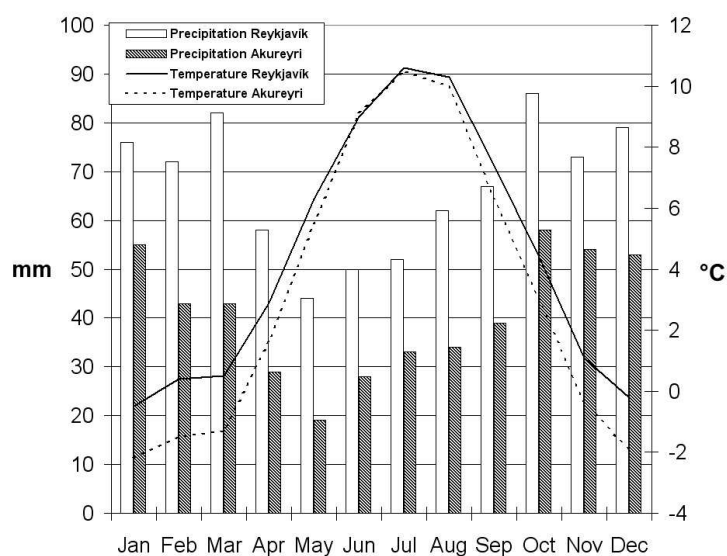
## 1.1 ISLANDA

### 1.1.1 INQUADRAMENTO GENERALE DELLE CONDIZIONI CLIMATICHE, PEDOLOGICHE E GEOMORFOLOGICHE ISLANDESI

L'Islanda è un'isola nel centro dell'Oceano Atlantico settentrionale, tra 63° e 66.6° di latitudine Nord e 13-24° di longitudine Est.

Buona parte del territorio islandese è interessato da forti venti, precipitazioni frequenti, inverni miti ed estati fredde (Ólafsson et al., 2007). Il clima predominante è il temperato freddo marittimo, con un regime subartico negli altipiani e numerosi cicli di gelo/disgelo nel periodo invernale (Crofts, 2011). Le temperature medie invernali ed estive sono prossime rispettivamente agli 0°C e 10°C (Ólafsson et al., 2007) Il territorio è caratterizzato da intensi processi di crioturbazione a carico del suolo, dovuti anche a ripetuti cicli di congelamento e scongelamento concentrati nel periodo invernale.

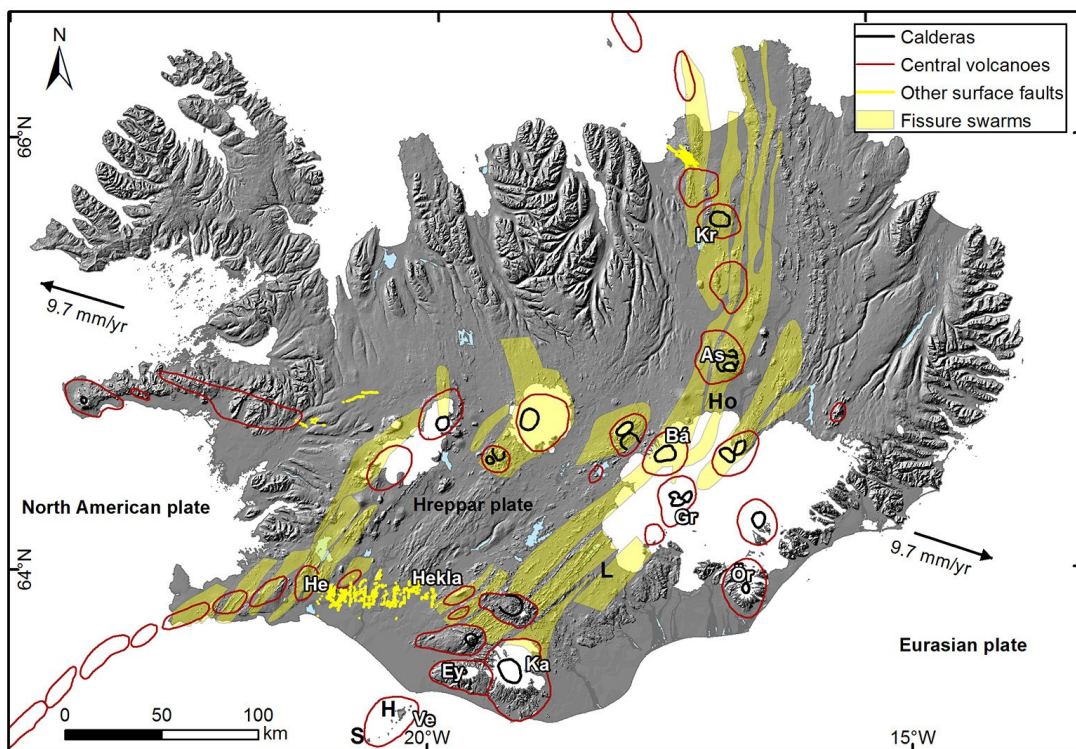
Le precipitazioni, in quelle aree dove la componente orografica non è dominante, variano dai 400 mm nel Nord/Nord-Est, a massimi di 4000 mm nel Sud-Est (Einarsson, 1984) come mostrato in Figura 1



**Figura 1** Temperature e precipitazioni medie mensili nel periodo 1961–1990 a Reykjavik (Southwest-Iceland) e Akureyri (North-Iceland). (Ólafsson et al., 2007)

L'Islanda è una regione vulcanicamente molto attiva, (**Figura 2**), si contano dai 20 o più eventi a secolo con una fuoriuscita di più di 5 km<sup>3</sup> di magma (Thordarson & Hoskuldsson, 2008).

In **Figura 2** è rappresentata la mappatura delle zone neovulcaniche e dei sistemi vulcanici attivi in Islanda: **Kr** Krafla, **As** Askja, **Bá** Bárðarbunga, **Gr** Grímsvötn, **Ör** Öräfajökull, Hekla, **Ka** Katla, **Ey** Eyjafjallajökull, **Ve** Vestmannaeyjar, **He** Hengill; e i siti di eruzione **Ho** Holuhraun, **H** Heimaey, **S** Surtsey.



**Figura 2** Mappa zone neovulcaniche e sistemi vulcanici attivi, Islanda (Crofts, 2011)

I suoli Islandesi sono stati modellati nel tempo da processi di esarazione, eventi erosivi ad opera di ghiacciai e torrenti annessi, e da intensi fenomeni di erosione eolica. I venti hanno infatti velocità variabili dai 5 m/s fino a più di 25 m/s in funzione dell'orografia, e ciò rende molto difficile la stabilizzazione e lo sviluppo del suolo (Ólafsson et al., 2007).

Le immagini da satellite mostrano che in Islanda più di 37.000 km<sup>2</sup> sono deserti aridi, a cui si aggiungono 10-15 km<sup>2</sup> di aree disturbate con limitata presenza di vegetazione (O. Arnalds et al., 2001). I deserti aridi comprendono una grande varietà di suoli, tra cui i deserti sabbiosi sono i più estesi.

Nell'isola circa il 21% dell'intera superficie regionale, pari ad un'estensione di 22.000 km<sup>2</sup> è classificabile come deserto freddo caratterizzato da precipitazioni limitate, vento secco e suolo molto drenante. Essi sono i più grandi deserti vulcanici di tutto il mondo.(O. Arnalds et al., 2001; Crofts, 2011).

(O. Arnalds & Kimble, 2001). La distribuzione dei deserti non è direttamente legata alle precipitazioni, ma risulta maggiormente correlata alla presenza di una cintura di vulcani attivi, che taglia l'isola in direzione sud/ sudest-nordest (vedi **Figura 2**). Difatti, in questa zona sono stati ritrovati residui di erosione ad opera di ghiacciai e cenere vulcanica. (O. Arnalds & Kimble, 2001). Essi sono composti principalmente da materiale vulcanico depositato come cenere vulcanica, o derivato dall'alterazione fisica di rocce vulcaniche da parte di ghiacciai o altri agenti. La frazione sabbiosa si presenta di colore scuro per via della natura principalmente basaltica ed è caratterizzata da un'elevata presenza di vetro. (O. Arnalds et al., 2001).

(Björnsson & Pálsson, 2008). A rendere ancor più particolare la situazione islandese è la presenza di ghiacciai che rappresentano l'11% della superficie emersa. Circa il 60% di questi ghiacciai si trovano in corrispondenza di siti vulcanicamente o geotermicamente attivi, che favoriscono improvvisi scioglimenti del ghiaccio provocando inondazioni periodiche, denominate "*jökulhlaups*". (Björnsson & Pálsson, 2008).

*Jökulhlaups* è un termine islandese utilizzato per indicare inondazioni causate da fuoriuscite di laghi subglaciali che provocano riversamenti imponenti di acqua e materiale detritico. Tipicamente si raggiungono picchi di 1000-3000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> di materiale riversato per un periodo che varia dai 2 ai 5 giorni, raggiungendo volumi di 2000 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (Bjornsson, 1992).

Questo fenomeno catastrofico trasforma profondamente il paesaggio circostante. Nel passato queste inondazioni hanno minacciato la vivibilità dei territori colpiti, causando anche svariati morti. Quando gli *jökulhlaups* si verificano, essi devastano fattorie e campi coltivati, spazzando via tutto ciò che si trova lungo il loro percorso (Bjornsson, 1992)

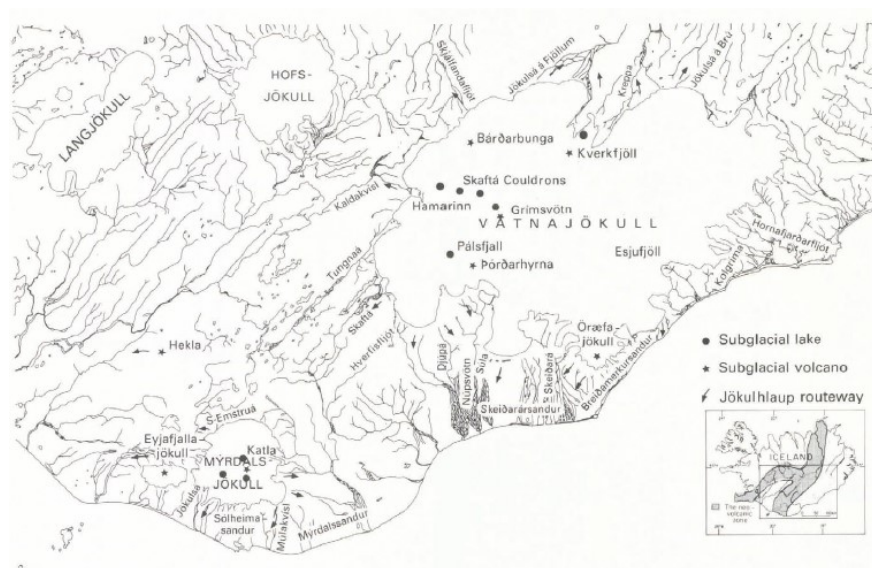
I *jökulhlaups* possono avere 3 diverse origini:

a) Generalmente i *jökulhlaups* si formano da laghi subglaciali nelle zone neovulcaniche dove il calore geotermico incontra il ghiaccio, provocandone lo scioglimento. L'acqua sciolta rimane intrappolata sotto il ghiacciaio che sigilla il lago, appunto chiamato subglaciale, creandone una

depressione all'interno del ghiacciaio stesso. Il lago crescendo sovraccarica la zona circostante alla depressione finché rompendo il sigillo si ha l'improvvisa fuoriuscita di tutta l'acqua accumulata.

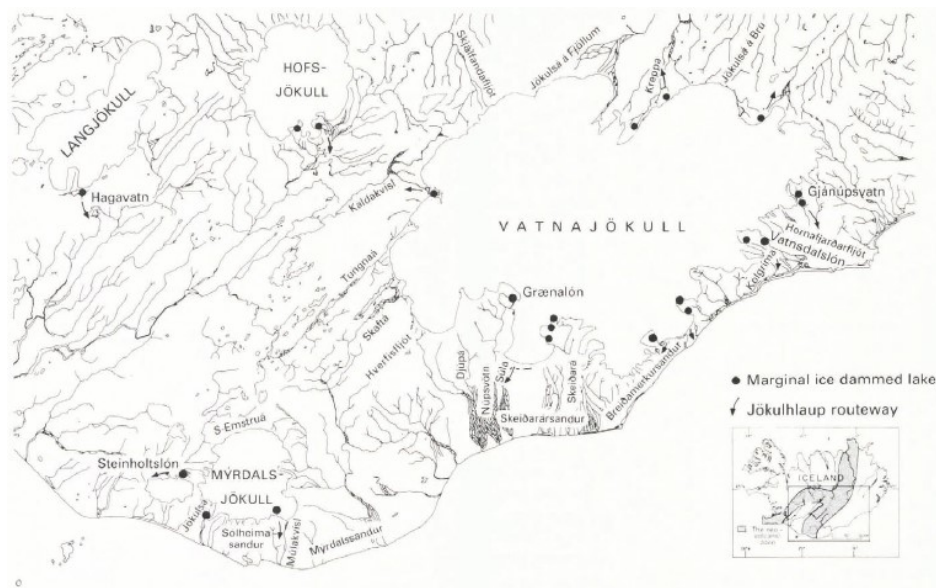
Ad oggi sono 9 i siti dove si è a conoscenza di laghi subglaciali originati da attività geotermica, 6 sotto il ghiacciaio *Vatnajökull* e i restanti 3 sotto il ghiacciaio *Myrdalsjökull* (Bjornsson, 1992)

b) I *jökulhlaups* originati da eruzioni vulcaniche riflettono quelli originati da calore geotermico. In presenza di un'eruzione c'è una fuoriuscita di materiale magmatico che a contatto col ghiaccio soprastante ne provoca lo scioglimento, analogamente alla situazione precedentemente descritta (Bjornsson, 1992)



**Figura 3** Laghi subglaciali nelle aree geotermiche, siti di eruzioni vulcaniche subglaciali, e fiumi colpiti da jokulhlaups, Islanda (Bjornsson, 1992)

c) Lo scioglimento dei ghiacciai, che è iniziato intorno all'ultimo secolo, ha creato degli *jökulhlaups* derivati dal ghiaccio marginale che, durante il XIX secolo, sciogliendosi incessantemente ha portato al riempimento, fino al raggiungimento della massima capacità, di laghi marginali facendoli strabordare. Questi *jökulhlaups*, che ad oggi si originano da 15 diversi siti **Figura 4**), sono quelli che creano più danni a fattorie e campi coltivati in quanto inaspettati.(Bjornsson, 1992)



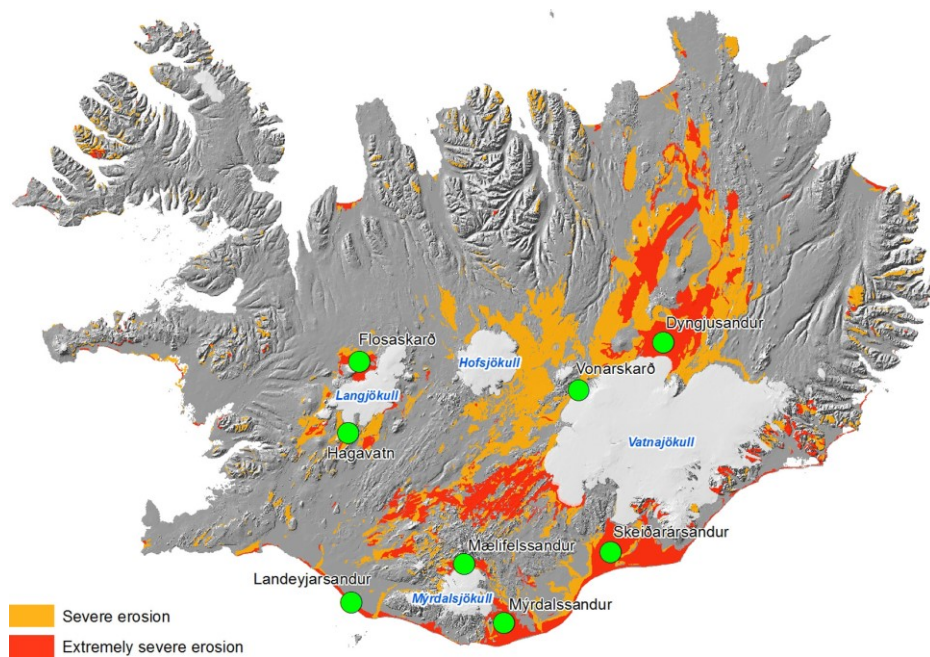
**Figura 4** Localizzazione di laghi di ghiaccio arginati e fiumi colpiti da jokulhlaups provenienti da questi laghi durante il XX secolo. (Bjornsson, 1992)

Queste inondazioni, grazie alla loro impetuosità, modellano il suolo attraverso processi erosivi, caricandosi di materiale che rielaborano durante il trasporto. Una volta che l'energia cinetica del fluido diminuisce, questo materiale viene depositato causando significativi impatti glaciologici e sedimentologici, lasciando dietro dei piani di depositi glacio-fluviali (Russell et al., 2006).

Quando questi depositi “glacio-fluviali” vengono ricoperti da sedimenti vulcanici si parla di depositi “vulcano-fluviali”, composti principalmente da basalti con andesite e riolite in piccole quantità (O. Arnalds et al., 2016) Essi sono molto instabili, per cui, sotto l'effetto del vento ad alte velocità, vengono erosi più o meno intensamente (**Figura 5**), provocando il trasporto e la ridistribuzione del sedimento nell'ecosistema circostante, influenzando fortemente le caratteristiche dei suoli islandesi.

I deserti sabbiosi sono perlopiù distribuiti nella porzione meridionale del territorio islandese, e ai margini dei ghiacciai delle zone vulcaniche attive, dal ghiacciaio “Myrdalsjökull” all'area nord-est del ghiacciaio “Vatnajökull”.

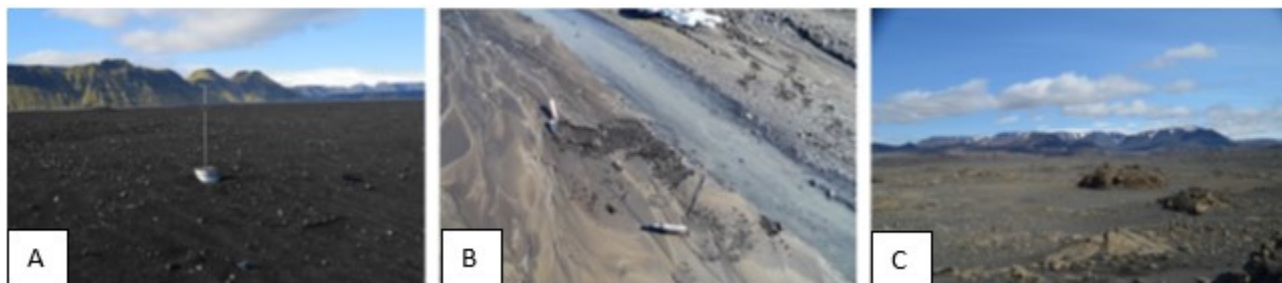




**Figura 5** Deserti sabbiosi in Islanda, mostrati con i colori giallo e rosso, in base al grado di severità dell'erosione (giallo; erosione di severità 4, erosione grave; rosso: erosione di severità 5, erosione estremamente grave). Molti hot-spot sono marcati con un bollino verde (O. Arnalds et al., 2016)

**Tabella 1** Superfici attualmente colpite dall'erosione eolica in Islanda. La voce 'Erosion severity' rappresenta l'attività erosiva: 3: considerable; 4: severe; 5: extremely severe. Basata su "Soil Erosion in Iceland" (O. Arnalds et al., 2001)

Surface type	Erosion severity			Total (km <sup>2</sup> )
	3 (km <sup>2</sup> )	4 (km <sup>2</sup> )	5 (km <sup>2</sup> )	
Sandur (sand-fields)	318	1087	2828	4233
Sandy lag-gravel	5407	6217	1286	12,910
Sandy lava	1366	1757	1620	4743
Total	7091	9061	5734	21,886
Total 4 + 5			14,795	



**Figura 6** Esempi di deserti sabbiosi più estesi in Islanda. A) Livello di suolo attuale mettendo in risalto la deflazione annuale (circa 30 cm); B) sedimento preso in carico da un flusso glaciale, scomparso nel giro di poche ore; C) superficie sabbiosa di origine vulcanica.

### 1.1.2 STORIA TERRITORIALE

L'Islanda oggi si presenta come un paese estremamente ostile alla vita, ma non è sempre stato così. Anticamente estese aree erano coperte da suolo fertile che supportava arbusti e alberi, ora molte di quelle aree sono suolo sterile. Questo ha fatto sì che gli islandesi, colpiti da un'estrema povertà, costituissero, più di 100 anni fa, il Soil Conservation Service, la più antica agenzia di questo tipo. (Crofts, 2011)

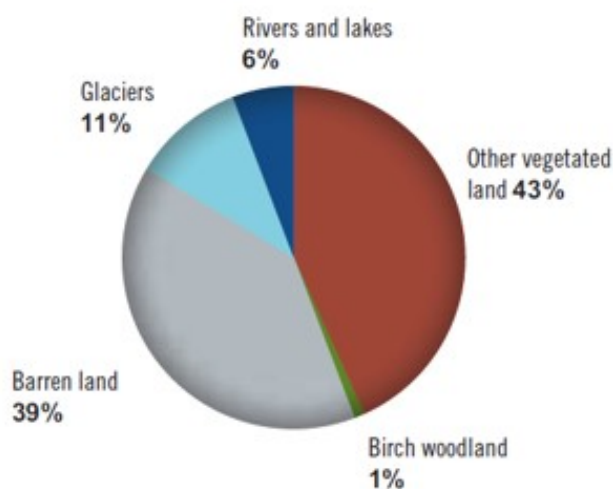
I cambiamenti della copertura vegetale sono stati attribuiti direttamente o indirettamente all'influenza dell'uomo, in combinazione con un clima avverso e un suolo facilmente erodibile. (Streeter et al., 2012)

L'uomo mise piede in Islanda circa nel 900 AD (Zori, 2016) con gravissime ripercussioni sull'ambiente circostante. Dalla colonizzazione in poi la vegetazione, e di conseguenza il territorio islandese, è profondamente mutato. Con l'insediamento umano si è rotto il delicato equilibrio che esisteva tra la vegetazione precaria, le ostili condizioni di crescita e la lenta formazione di suolo. Sommato a cicli di gelo/disgelo e a condizioni climatiche avverse, hanno portato alla formazione di spots di suolo spoglio estremamente suscettibili all'erosione eolica, accelerando anche la rimozione della vegetazione circostante (Crofts, 2011)

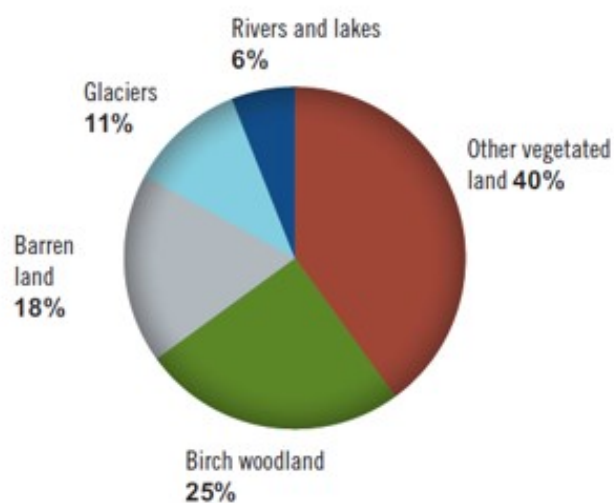
La vegetazione residua fornisce delle informazioni sul passato e su quale sia la vegetazione climax dell'Islanda. Tale vegetazione ora la ritroviamo in quelle aree sfuggite, poiché inaccessibili, al pascolamento degli animali. (A. Arnalds, 1987)

Circa il 65% della superficie islandese sembra che fosse vegetata nel momento dell'insediamento (Thorsteinsson et al., 1971) La superficie di foreste di *Betula pubescens* ricopriva tra il 25% e il 40% del totale del paese, mentre ora la copertura boschiva si aggira intorno all'1%. *Salix* spp. e altri arbusti nani dominavano la vegetazione in ampie aree, Ciperacee e altre graminoidi dominavano le aree più umide dove il bosco era assente. (A. Arnalds, 1987)

**Vegetation cover today**



**Vegetation cover 900 AD**



*Figura 7 Copertura vegetale nel periodo dell'insediamento nel nono secolo e nel ventesimo secolo. Fonte: IINH (Crofts & Olgeirsson, 2011).*

Successivamente all'insediamento, i coloni rimossero ampie aree boschive per far spazio a fattorie, campi coltivati, pascoli, e per ottenere legname e combustibile. Per rimuovere rapidamente ampie superficie di bosco si usò il fuoco, che a volte sfuggiva dal controllo, bruciando ampie aree. Il legno fu la prima fonte di combustibile per le fattorie, grandi quantità ne furono utilizzate per ottenere del carbone oltre ad essere utilizzato per costruire barche ed attrezzi (A. Arnalds, 1987; Crofts, 2011)

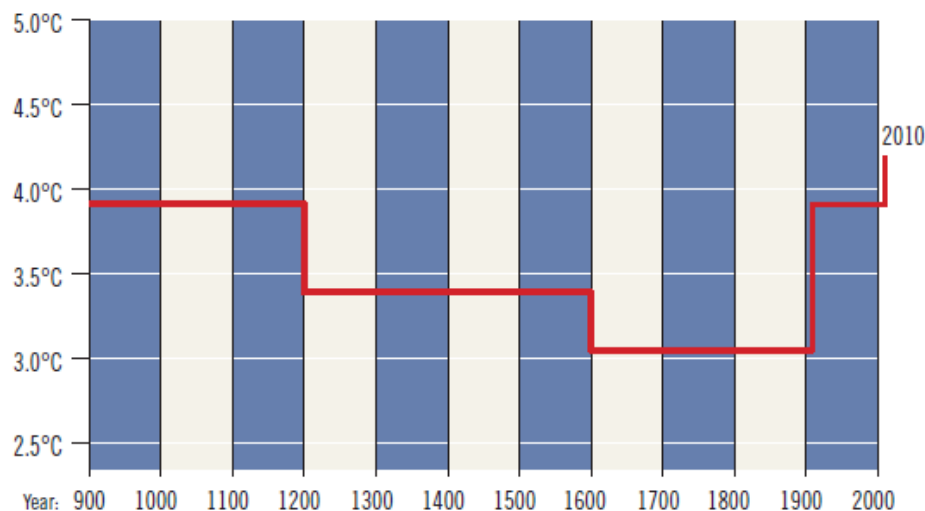
I Coloni introdussero in Islanda per la prima volta anche i mammiferi erbivori, costituendo rapidamente popolazioni di pecore, capre, maiali, vacche e cavalli (Amorosi et al., 1997; Dugmore et al., 2009)

Il pascolo senza limitazioni, unito alla riduzione dei boschi tramite fuoco e abbattimenti, ridussero la rinnovazione di betulla e altre specie legnose. Le informazioni ottenute dalla vegetazione residua e dal suolo presente nelle aree erose sono state utilizzate per ricostruire i cambiamenti del territorio. Il tasso e la natura delle successioni in quelle aree protette dal pascolamento indicano che l'ecosistema islandese è stato molto più produttivo rispetto a ciò che la vegetazione attuale suggerisce. Con la riduzione della superficie boschiva, il suolo già di natura molto suscettibile, ha perso la sua protezione verso fenomeni erosivi. (A. Arnalds, 1987)

Studi di tefrocronologia, analisi del polline e altri studi, hanno permesso di stimare che i primi fenomeni erosivi su larga scala coincidono con l'insediamento umano. In linea generale, infatti, si evidenzia un incremento della velocità di erosione del suolo lungo il XVIII secolo, raggiungendo il massimo tra il XIX e l'inizio del XX secolo (A. Arnalds, 1987)

Ad implementare l'impatto umano è stato il drammatico cambiamento delle condizioni ambientali nel periodo successivo alla colonizzazione, con una diminuzione generale delle temperature e un raccorciamento degli interludi di clima più caldo (Crofts, 2011)

Come mostrato in **Figura 8**, dal momento dell'insediamento fino al 1200 le temperature erano tipicamente miti, molto più freddo il periodo che va dal 1200 al 1600. Il periodo più freddo è stato dal 1600 al 1920, dal 1871 in poi si è registrato un aumento delle temperature medie registrate dalla maggior parte delle stazioni (Hanna et al., 2004)



**Figura 8** Temperature annuali medie attraverso 4 periodi di tempo. (Crofts, 2011)

Data la complessità e la varietà dei fattori incidenti sul territorio islandese, è difficile stabilire le cause esatte, e il loro relativo peso, nel cambiamento avvenuto nell'ultimo millennio, ma lo studio del passato è essenziale per comprenderne le dinamiche e provare a contrastarne l'effetto, invertendo la rotta.

Per provare a fare ciò il Servizio foreste islandese di aumentare la copertura forestale dal 2% attuale al 12% entro il 2100 piantando 3 milioni di alberi ogni anno (L. Brenna, 2018, Lifegate).

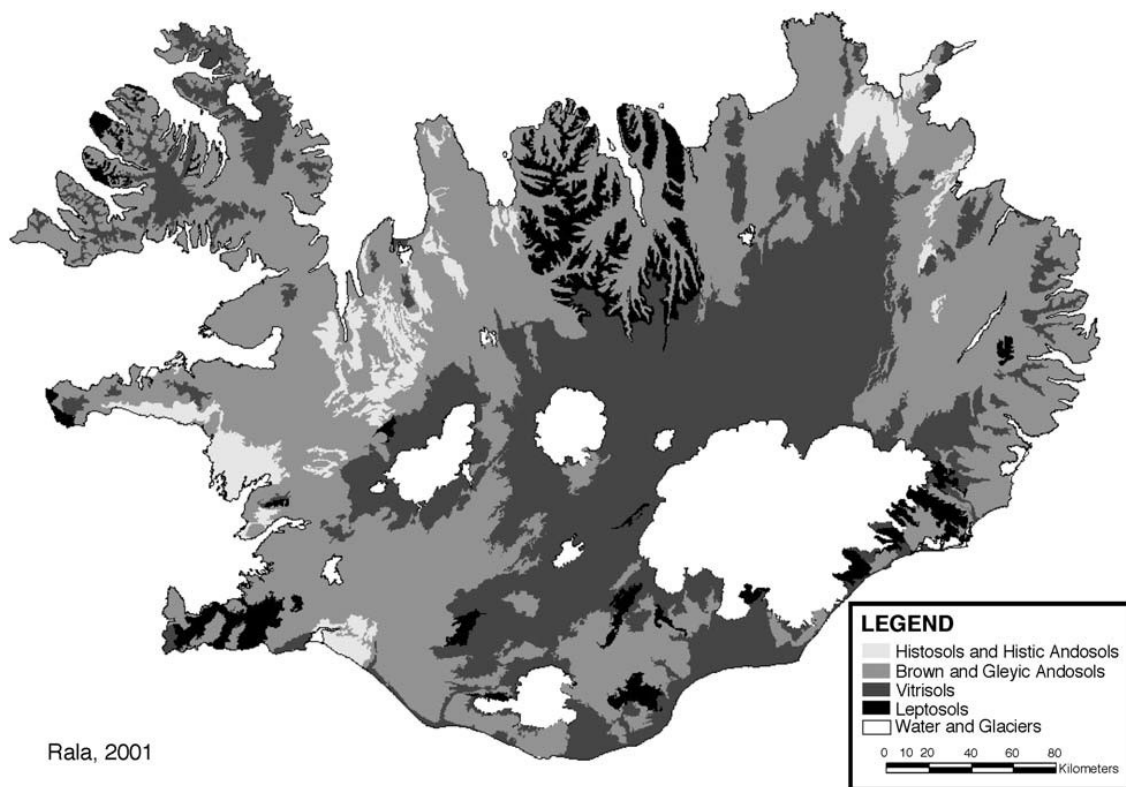
### 1.1.3 SUOLI ISLANDESI

Le particolari condizioni ambientali Islandesi hanno fatto sì che i suoli di questa regione si differenziassero dalla maggior parte dei suoli Europei.

Arnalds (2004) propose, in accordo con la tassonomia WRB, di classificare i suoli in diversi gruppi: Histosols, Histic Andosols, Gleyic Andosols, Brown Andosols, Vitrisols e Leptosols.

Tale classificazione può essere semplificata, considerando la presenza di vegetazione, in 2 principali gruppi (O. Arnalds, 2008):

- suoli con copertura vegetale e proprietà andic e/o histic
- suoli dei deserti, principalmente denominati Vitrisols per l'elevato contenuto in vetro.



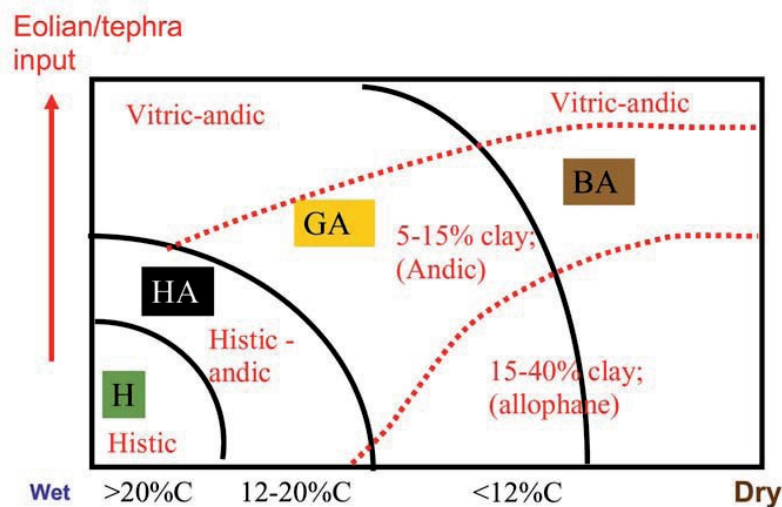
*Figura 9* Semplificazione della mappa dei suoli islandese, basata su Arnalds and Gretarsson (2001) Molti dei Vitrisols sono stati classificati come Andosols coerentemente con la WRB e Andisols in linea con la Soil Taxonomy. (O. Arnalds, 2004)

**Tabella 2** Tipi di suolo, principali criteri diagnostici e classificazione in accordo con la Soil taxonomy (S.T)<sup>2</sup> e la WRB<sup>3</sup>. Estensione per ciascuna classe espressa in accordo con la mappa 1:25.000 (Figura 9) (O. Arnalds, 2008).

Soil Type	Symbol	Diagn.pr. <sup>1</sup>	Extend	%	S.T. <sup>2</sup>	WRB. <sup>3</sup>
<i>Histosol</i>	H	>20% C	1077	1	Histosol	Histosol
<i>Histic Andosol</i>	HA	12–20% C	4700	5	Aquand	Gleyic/Histic Andosol
<i>Gleyic Andosol</i>	GA	<12% C; gley and/or mottles	2600	3	Aquand	Gleyic Andosol
<i>Brown Andosol</i>	BA	<12% C, dry; > 6% allophane	14,300	14	Cryand	Haplic/Mollic Andosol
<i>Cambic Vitrisol</i>	MV	<1,5% C < 6% allophane	17,600	17	Cryand	Vitric Andosol/ Regosol/Leptosol
<i>Arenic Andosol</i>	SV	Sand	4600	4	Cryand	Vitric Andosol/ Arenosol/Leptosol
<i>Leptosol</i>	L	Rock/Scree	7300	7	Entisol	Leptosol
<i>Cryosol</i>	C	Permafrost	?		Gelisol	Cryosol
<i>Brown and Gleyic Andosol</i>	BA-GA		27,200	26		
<i>Complex</i>	SV-L		4800	5		
<i>Complex</i>	MV-SV		6000	6		
<i>Complex</i>	C-GA		140	0		

I suoli coperti da vegetazione, sono classificati considerando l'imput di materiale piroclastico/eolico e il drenaggio, come mostrato in Figura 10. Andando da suoli con condizioni di saturazione verso suoli con un drenaggio maggiore si passa attraverso i seguenti tipi: Histosols (C>20%), Histic Andosols (12- 20 % C), Gleyic Andosols (C < 12%, poco drenanti) e Brown Andosol (C<12%, fortemente drenanti). Suoli con proprietà histic sono maggiormente presenti nelle zone più umide caratterizzate da bassi apporti di materiale piroclastico/eolico.

Il passaggio da suoli più umidi e con un minor apporto di materiale piroclastico/eolico viene considerato come un indicatore della distanza da zone vulcaniche attive e fonti di materiale eolico. Suoli molto umidi e con scarsi apporti di materiale piroclastico ed eolico si caratterizzano per un accumulo di sostanza organica che porta a un contenuto di Corg> 20%. (Arnalds Ó. , 2008)



**Figura 10** Separazione di Andisols e Histosols islandesi, basati su drenaggio (asse X) e input eolici (asse Y).

(Arnalds Ó. , 2008)

Se non fosse per l'attività vulcanica i suoli islandesi sarebbero prevalentemente classificati come Histosols, coerentemente agli altri suoli tipici di ambiente artico.



**Figura 11** Deserto islandese, Sandy lag gravel surface. La copertura vegetale non supera l'1/2% (Arnalds & Kimble, 2001).

I Vitrisols sono suoli desertici, generalmente poco fertili, colpiti da processi di crioturbazione ed erosione. Secondo il sistema di classificazione WRB e Soil Taxonomy dell'USDA, i Vitrisols rientrerebbero rispettivamente negli ordini degli Andosols e Andisols, ma tale gruppo è stato proposto considerando le particolari condizioni islandesi (O. Arnalds, 2004; 2008)

I Vitrisols includono un'ampia gamma di suoli islandesi che per rientrare in questo gruppo devono rispettare una delle seguenti condizioni (Arnalds , 2004):

- contenuto Corg <1%; o
- Si<sub>0</sub><1%.

I Vitrisols generalmente hanno una limitata copertura vegetale (5-10%) e si riconoscono anche per gli evidenti segni di crioturbazione superficiale, che spesso ricordano un deserto. Le superficie tipica è chiamata 'lag- gravel', ma ci sono anche altre morfologie, come la 'Sandy lag gravel' (Figura 11).

I Vitrisols sono suoli sabbiosi poco profondi, in cui la componente mineralogica è dominata da vetro vulcanico (>30%). Essi soddisfano la maggior parte dei criteri degli Andosol nella WRB, con >0,4% di (Al+1/2Fe) e >30% di vetro vulcanico<sup>1</sup>. Quando si sviluppano in sedimenti eolici sono considerati Leptosols.

Lo sviluppo del suolo è fortemente influenzato dalla vegetazione che, se riesce a colonizzare dei Vitrisols, in 50-200 anni a seconda delle condizioni climatiche, permette lo sviluppo di caratteristiche di un Brown Andosols (Arnalds O. , Volcanic soils of Iceland, 2004). Una ricolonizzazione da parte della vegetazione porta ad un aumento del contenuto di sostanza organica, con conseguente abbassamento del pH, e ad un aumento del contenuto di N, soprattutto nei primi stadi della successione ecologica. Quest'accumulo di sostanza organica e N è favorito dai climi freddi, dove il tasso di mineralizzazione è lento.(Bonatatzky et al., 2019)

---

<sup>1</sup> Vitric properties, pag.74 WRB (FAO, 2015).



#### 1.1.4 CARATTERISTICHE DEI SUOLI ISLANDESI

I suoli islandesi sono molto giovani, in quanto sviluppati a partire dall'Olocene (era geologica che va da circa 11.700 anni fa ad oggi) da materiale tefra (piroclasti) e/o eolico risalente alla Würm, l'ultima glaciazione, che ha ricoperto la superficie islandese. In questo processo di ricoprimento hanno avuto un ruolo fondamentale anche la lava e i depositi glacio-fluviali depositati dagli '*jokulhlaups*'. (O. Arnalds, 2004, 2008).

Questi suoli sono perfetti per lo studio dei processi di genesi del suolo lungo una scala temporale, di fondamentale importanza per prevedere future evoluzioni in determinati contesti come quello islandese, e cercare di ripristinare quell'ecosistema che si è perso a seguito della colonizzazione.

Come già precedentemente riportato, la maggior parte dei suoli islandesi rientrerebbero nell'ordine degli Andisols, per la Soil Taxonomy, o nel gruppo degli Andosols per la WRB. Gli Andisols, infatti, o i rispettivi Andosols, sono suoli "giovani", tipici di zone vulcanicamente attive, e quindi caratterizzati da ricoprimenti successivi di materiale neoformato.

La cenere vulcanica viene identificata come materiale tephra. I termini 'tephra' e 'tephrachronology' sono stati introdotti dal geologo islandese Thorarinsson (1944). Larsen et al. hanno discusso dell'importanza del materiale tephra risalente all'Olocene in Islanda, poiché, dall'ultima glaciazione del Quaternario, la superficie islandese è stata ricoperta da materiale eolico e tephra, su cui il suolo si sta sviluppando (Larsen, 2000; Larsen et al., 2001).

La tephrachronology si occupa di dare una datazione ai vari strati di materiale tephra, questo risulta essere molto utile per studiare i processi geomorfologici.

Gli Andosols spesso contengono strati di materiale piroclastico (tephra), che generalmente è di natura basaltica. Gli strati di materiale piroclastico ricchi in basalti sono di colore scuro, essi danno il colore tipico agli Andosols, mentre gli strati ricchi in riolite, più rari, sono di un colore più chiaro (O. Arnalds, 2008).

La velocità dell'alterazione dei suoli islandesi è rilevante, pur avendo un clima non ottimale caratterizzato da frequenti cicli di gelo/disgelo. Nonostante la rapidità dell'alterazione a carico dei materiali piroclastici, strati ricchi in riolite si alterano più lentamente rispetto agli strati ricchi in basalto (Bonatutzky et al., 2019).

La maggior parte dei prodotti dell'alterazione di questo parent material vengono rimossi dal sistema suolo, questo però non avviene per l'Alluminio, il Ferro e il Silicio che riprecipitano formando minerali amorfi quali: Allofane, imogoliti e Ferridrite.

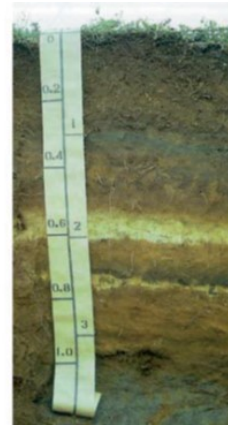
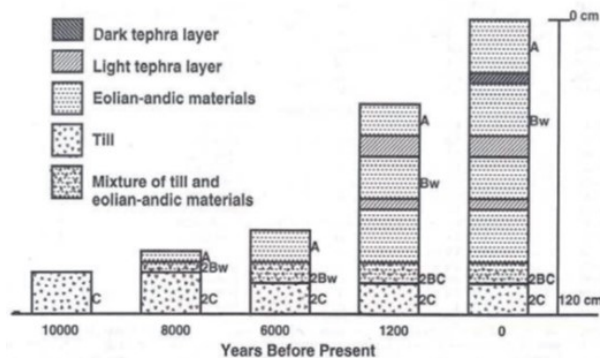
La presenza di sostanza organica inibisce, molto debolmente, la formazione di allofane e imogoliti poiché, la sostanza organica crea dei chelati con l'alluminio, inibendo la formazione di questi minerali amorfi.

La successione tipica nei suoli islandesi è: A-Bw-C, ma l'uso del suffisso sepolto 'b' e del prefisso '2' per indicare i sepolti e nuove fasi nello sviluppo rende difficile la descrizione del suolo.

Una caratteristica importante degli Andosols islandesi è quella di accumulare sostanza organica, per 2 motivi principali:

- la formazione di complessi metallo-humus,
- il clima freddo che inibisce la mineralizzazione della sostanza organica, ancor più se ci troviamo in suoli saturati nelle wet-land islandesi.

In **Figura 12** si mostra graficamente come avviene lo sviluppo di un tipico Andosol islandese, dove vi è una forte componente di input eolico. Il sedimento glaciale (circa di 9000 anni fa) è alla base del profilo ed è gradualmente ricoperto da sedimenti eolici e materiale piroclastico. Differenze di colore degli strati di materiale piroclastico sono dovuti al vulcano Mt. Helka (sono più chiari poiché ricchi di riolite), mentre lo strato più scuro risale al 1480 A.D. Gli strati più spessi mostrano limitati segni di alterazione, specialmente per la riolite (orizzonte C). Il suolo tra gli strati di tephra, di data nota, fornisce un'indicazione delle condizioni ambientali durante quel periodo. Maggiori quantità di argille e sostanza organica si sono accumulate durante i periodi più favorevoli.

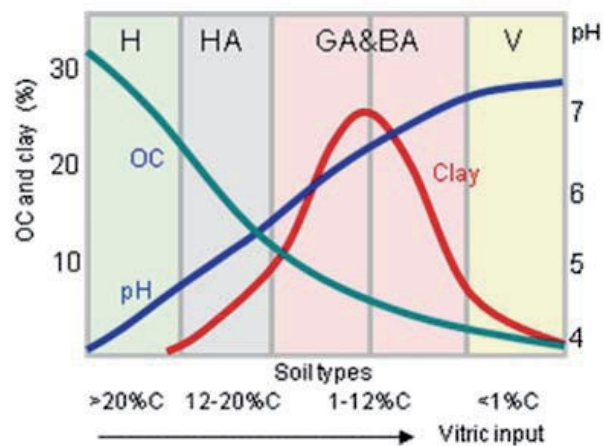


**Figura 12** Sviluppo di un tipico Andosols in Islanda che si forma con materiale tefra ed eolico. Adattato da Arnalds et al. (1995) e Kimble et al. (2000). Il suolo si è formato nei pressi di Goðafoss in North Iceland. (O. Arnalds, 2008)

Questa complessa situazione ha fatto sì che i suoli islandesi presentassero delle proprietà andiche in combinazione con proprietà degli Histosols, rendendoli unici. (O. Arnalds, 2008)

Dall'altra parte, la forte erosione eolica, ha trasformato gli Andosols coperti da vegetazione in deserti aventi suoli con minime quantità di sostanza organica. Circa la metà della sostanza organica erosa va incontro ad ossidazione ritornando in atmosfera. (Óskarsson et al., 2004)

L'erosione eolica provoca un innalzamento del pH del suolo, così come l'alterazione dei basalti che porta a un rilascio di ioni che alzano il pH. (Arnalds Ó. , 2008). Come mostrato in **Figura 13** l'influenza dell'erosione eolica e il drenaggio risultano essere dominanti per il contenuto di argille, sostanza organica e pH. Il pH del suolo diviene minore con minori contenuti di sostanza organica, un basso pH impedisce la formazione di allofane in Histic Andosols (HA) e Histosols (H).



**Figura 13** Relazione tra i tipi di suoli (asse delle X) e pH, contenuto in carbonio e contenuto di argille. Lungo l'asse delle X, da sinistra a destra abbiamo: Histosols(H), Histic Andosols (HA), Gleyic Andosols (GA), Brown Andosols (BA) e Vitrisols(V). Il contenuto di sostanza organica è usato per discriminare le varie classi (O. Arnalds, 2008).

I suoli islandesi sono soggetti anche a frequenti cicli di congelamento/ scongelamento che causano morfologie particolari, come gli 'hummocks' (**Figura 14**), lingue e gradoni di geliflussione, patterned ground, e superfici rocciose (tipico dei deserti freddi), contribuendo a rendere unico il paesaggio islandese(O. Arnalds, 2008). Gli Andosols sono più suscettibili all'alternarsi di questi cicli poiché, avendo proprietà andiche, sono tipicamente più ricchi di sostanza organica, elevata permeabilità e un minimo contenuto di argille a reticolo espandibile.



**Figura 14** Hummocks in Islanda. (O. Arnalds, 2008)

La formazione di hummocks è causata dall'acqua si accumula principalmente sotto le rocce con maggiori diametri, quando quest'acqua congela, aumentando di volume, solleva leggermente la roccia; questo processo ripetuto centinaia/migliaia di volte porta in superficie le rocce con i diametri maggiori.

Le argille formano degli aggregati, di dimensione pari al limo, che permettono all'acqua di infiltrarsi e circolare velocemente. Il suolo generalmente ha una bassa densità apparente, che per i suoli islandesi generalmente si aggira intorno ai 0.3-0.8 g cm<sup>3</sup>, ma hanno un'alta capacità di ritenzione idrica, nella maggioranza dei casi a 0.3 bar di tensione. La coesione è bassa e può facilmente raggiungere il limite liquido<sup>2</sup>. Il movimento dell'acqua può essere ostacolato dalla presenza di materiale a grana grossa che impediscono un movimento d'acqua in condizioni di insaturazione.

I Vitrisols hanno diverse caratteristiche fisiche che spesso sono tipiche dei suoli sabbiosi, ovvero una bassa capacità di ritenzione idrica e una rapida infiltrazione d'acqua in estate.

In Genere gli Andosols, come gli Histosols, hanno la tendenza ad accumulare sostanza organica. Essi, infatti, sono gli ordini di suolo che immagazzinano il maggior quantitativo di CO per area, con valori medi globali di 31 kg/m<sup>2</sup> per gli Andosols e 218 kg/m<sup>2</sup> per gli Histosols.

La capacità di scambio cationico è alta (CEC a pH=7 spesso è maggiore di 30 cmol kg<sup>-1</sup>), mentre il pH dei suoli varia dal 5.5 al 6.5 negli Andosols, a 4.5-5.5 negli Histosols e 7-7.5 nei Vitrisols. Gli Andosols e gli Histosols sono suoli fertili, sebbene negli Andosols si possono manifestare carenze di P legate alla presenza di Allofane e imogolite, che adsorbono selettivamente ioni fosfato, portando alla sua immobilizzazione (per la maggioranza dei suoli islandesi ha una ritenzione fosfatica >90%). (O. Arnalds, 2008; Gudmundsson et al., 2005).

Anche i Vitrisols hanno una buona capacità di scambio cationico e capacità di ritenzione idrica, ma sono poveri di nutrienti a causa del basso contenuto di sostanza organica.(O. Arnalds, 2008).

---

<sup>2</sup> Il limite liquido è fissato convenzionalmente dal contenuto d'acqua wL in corrispondenza del quale un provino di terreno, posto in una coppetta di dimensioni normalizzate, suddiviso in due parti con un apposito utensile solcatore, e fatto rimbalzare da un'altezza di 10 mm per 25 volte, determina la chiusura del solco per la lunghezza di 13 mm.

## 1.2 MICRORGANISMI DEL SUOLO

### 1.2.1 CLASSIFICAZIONE

Il suolo è caratterizzato da un'estrema variabilità e complessità di condizioni ambientali, che consentono di ospitare un numero molto elevato di organismi viventi. In una manciata di suolo agricolo (circa 200 grammi) si possono trovare 0,5 grammi di organismi viventi, molti dei quali non visibili ad occhio nudo, come ad esempio i batteri.

Per comprendere a pieno lo sviluppo del suolo non possiamo trascendere dallo studio dei microrganismi, che spesso sono i primi bioindicatori di un processo in atto, in quanto sono organismi molto reattivi nella creazione di nuove nicchie e/o variazioni ambientali. Questo è permesso per il loro ciclo di vita molto rapido.

Tra le varie comunità microbiche che popolano il suolo solo alcune vengono studiate. Principalmente si studiano batteri e funghi. Tra i batteri generalmente si distinguono diverse comunità in base alle loro caratteristiche e alla loro ecologia. I Gram positivi si differenziano dai Gram negativi principalmente per il contenuto in peptidoglicano nella parete, 90% per i Gram positivi e 10% per i Gram negativi. Essi vengono distinti in laboratorio tramite la colorazione Gram, dove i Gram positivi rimangono colorati di viola per il cristalvioletto, mentre i Gram negativi si colorano di bordò per via della seconda colorazione a base di safranina. Gli attinomiceti appartenengono generalmente ai Gram positivi, che si sviluppano sottoforma di filamenti ramificati, ricordando il micelio fungino. I batteri svolgono un ruolo chiave per il sostentamento dell'ecosistema in quanto sono capaci di entrare in ogni fase del ciclo dei nutrienti con grande reattività. Generalmente i Gram positivi sono considerati a strategia K, ovvero crescono lentamente fino al raggiungimento di un equilibrio con la capacità portante dell'ambiente. Essi crescono molto lentamente in ambienti poveri in nutrienti. I batteri Gram negativi hanno una strategia R, ovvero crescono molto velocemente ma subiscono repentini crolli di popolazione, essi proliferano in suoli con abbondanza di nutrienti. (Guan et al 2021).

Anche tra i funghi si hanno delle distinzioni basate sulla loro ecologia.

I funghi AMF (Arbuscular Mycorrhizal Fungi), generalmente basidiomiceti, creano delle particolari strutture, le micorrize arbuscolari, attraverso le quali instaurano un rapporto di simbiosi mutualistica con la pianta. Queste vengono dette endomicorizze, ovvero entrano a livello del capillizio radicale e instaurano un collegamento, dove avviene un interscambio di nutrienti. La

costruzione della micorriza arbuscolare richiede un'alta compatibilità pianta fungo necessaria al riconoscimento e l'instaurazione del rapporto di simbiosi.

Attraverso questo legame la pianta nutre il fungo con gli zuccheri che produce attraverso la fotosintesi, mentre il fungo permette di estendere l'apparato assorbente della pianta, anche di 1000 volte, attraverso le ife rendendo entrambi più resistenti agli stress e più efficienti.

I funghi ectomicorrizici invece sono quei funghi che instaurano un rapporto simbiosi mutualistica analoga ai funghi AMF, ma essi rimangono fuori dalla radice. Infatti, avvolgono il capillizio radicale all'esterno, attraverso un legame meno specifico in quanto non è necessaria una forte compatibilità fungo pianta come nel caso degli AMF.

I funghi saprofiti sono funghi decompositori che si nutrono di materiale organico non più vivente. Essi rivestono un ruolo fondamentale nel ciclo dei nutrienti in quanto rimettono in circolo nel sistema suolo nutrienti derivati dal materiale organico che arriva al suolo.

Tra i microrganismi troviamo anche i protozoi, organismi uni e pluricellulari che vivono a spese di altri batteri. Essi hanno un ruolo ecologico fondamentale nel ciclo dei nutrienti in quanto tengono in fase di crescita attiva le comunità batteriche regolandone il numero.

### 1.2.2 METODI DI ANALISI

Per poter studiare e comprenderne l'attività di questi microrganismi si ha bisogno di un biomarker, che ci permetta di valutarne la presenza. Fino al 1970 si è usato l'ATP come marker biochimico per ricavarne la biomassa. I requisiti per un buon biomarker sono (Jenkinson and Ladd 1981):

1. il componente misurato deve essere in tutte le parti della biomassa nel suolo in concentrazioni note e costanti;
2. il composto deve essere presente unicamente in organismi vivi e non deve essere presente in altre parti non vive del materiale organico del suolo.
3. deve essere un componente estraibile e quantificabile;
4. ci deve essere un metodo accurato e standardizzato che ne permetta l'estrazione.

Lo studio dei PLFA (Phospho-Lipid Fatty Acid) soddisfa tutti questi criteri, in quanto i fosfolipidi sono presenti in tutte le membrane cellulari. Un'analisi degli acidi grassi (PLFA) fornisce infatti una descrizione quantitativa della comunità microbica in un particolare ambiente in un determinato momento. La determinazione della biomassa e della diversità microbica per mezzo dell'analisi dei PLFA fornisce informazioni sulla distribuzione di comunità microbiche e la loro risposta a diverse disponibilità dei nutrienti (Frostegård et al., 2011; Willers et al., 2015).

Per lo studio dei PLFA si assume che specifici fosfolipidi sono indicatori di un particolare gruppo, come mostrato in **Tabella 3**. I biomarker dei PLFA hanno una bassa risoluzione, il che non permette di risalire alla specie ma è utile per suddividere in gruppi. I risultati dell'analisi dei PLFA sono espressi in nmol o pmol per grammo di suolo (Willers et al., 2015 Frostegård et al., 2011).



**Tabella 3** Biomarker utilizzati in questo studio per identificare i principali gruppi di microrganismi

	<b>SATURAZIONE</b>	<b>NOME</b>
<b>G+</b>	i14:0	12 methyl tridecanoic acid methyl ester
	i15:0	13 methyltetradecanoic acid methyl ester
	a15:0	Tetradecanoic acid, 12-methyl-, methyl ester
	i16:0	Pentadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester
	i17:0	Hexadecanoic acid, 15-methyl-, methyl ester
	a17:0	14 methyl hexadecanoic acid methyl ester
<b>G-</b>	16:1w7c	9-Hexadecenoic acid, methyl ester, cis (z)
	Cy17:0	methyl cis-9,10-methylenehexadecanoate
	18:1w9t	9 Octadecenoic acid (E) methyl ester
	18:1w7c	cis 11 -octadecenoic acid methyl ester
	Cy19:0	methyl cis-9,10-methyleneoctadecanoate
<b>Bacterial general</b>	14:0	methyl tetradecanoate
	15:0	Pentadecanoic acid, methyl ester
	16:0	Hexadecanoic acid methyl ester
	17:0	Heptadecanoic acid methyl ester
	18:0	Octadecanoic acid, methyl ester
	20:00	icosanoic acid
	22:00	docosanoic acid methyl ester
<b>FUNGI</b>	18:2 w6,9	9,12-Octadecadienoic acid, methyl ester, (E,E)-
	18:3w6c	9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester
	18:1w9c	9 Octadecenoic acid (Z) methyl ester
<b>ACTINO</b>	10Me 16:0	10 methyl hexadecanoic acid
	10Me 17:0	10 methyl heptadecanoic acid methyl ester
	10Me 18:0	methyl 10-methyloctadecanoate,
<b>PROTOZOA</b>	20:4w6	5,8,11,14-Eicosatetraenoic acid, methyl ester
Arbuscolar mycorrhiza	16:1w5c	11 hexadecenoic acid methyl ester

In genere le comunità microbiche sono più ricche con elevati contenuti di carbonio disponibile, inoltre essudati radicali ricchi in carbonio favoriscono l'incremento della biomassa microbica

(Willers et al., 2015). Le comunità microbiche oltre ad essere avvantaggiate da elevati contenuti di sostanza organica e N, sono anche influenzati dalla tessitura del substrato. Infatti, un'elevata superficie specifica, favorisce il loro sviluppo. I suoli vulcanici, come quelli islandesi, generalmente hanno tessiture grossolane, e con scarsa capacità di ritenzione idrica, per cui le comunità microbiche hanno difficoltà a svilupparsi (Kaštovská et al., 2007).

Dall'analisi dei PLFA si possono estrarre diverse informazioni in base agli indici che estrapoliamo, i più comuni ad esempio sono il rapporto F/B (funghi : batteri) e GP/GN (Gram + : Gram -), che riescono a dare informazioni riguardo l'evoluzione dell'ecosistema.

Il rapporto GP/GN è usato per descrivere la resistenza a carenze nutrizionali, un aumento di tale indice indica una maggiore disponibilità di nutrienti nel suolo.(Guan et al., 2021)

L'indice F/B (fungal/bacteria), si ottiene facendo il rapporto tra la biomassa dei funghi, su totale dei PLFA, e la biomassa microbica su totale PLFA. Esso fornisce informazioni similari al rapporto GP/GN. Un aumento del rapporto F/B indica un incremento della componente fungina nella comunità microbica, queste variazioni possono essere associate a variazioni nel ciclo dei nutrienti, materiale organico e stoccaggio di carbonio. Un aumento dell'indice F/B indica quindi una maggiore resistenza della comunità microbica. (Guan et al., 2021; Willers et al., 2015).

Un aumento dell'indice MUFA/SUFA, ottenuto dalla somma dei grassi monoinsaturi diviso la somma di saturi nel suolo, si usa per indicare un'alta disponibilità del substrato (Bossio and Scow 1998). Un incremento dei SUFA/MUFA e trans/cis (degli acidi grassi monoinsaturi), è indicatore di stress. Ci sono numerosi altri indici che forniscono informazioni differenti.

La funzionalità delle comunità microbiche del sistema suolo si possono anche studiare per mezzo dell'analisi dell'attività enzimatica extracellulare. Gli enzimi del suolo sono biomolecole responsabili della qualità e quantità della frazione di sostanza organica essendo coinvolti in tutti i cicli biogeochimici, rendendo disponibili i nutrienti dei minerali. Essi sono importanti e affidabili indicatori della qualità del suolo (Nannipieri et al 2012). Si pensa che gli enzimi idrolitici controllino l'intensità di alterazione del substrato, quindi la disponibilità di nutrienti per comunità microbiche e vegetali (Marx et al. 2001). Lo studio degli enzimi idrolitici ha lo scopo di studiare le funzionalità del suolo e di cercare di comprendere come circolano, vengono idrolizzati e resi disponibili i nutrienti nel sistema suolo (Nannipieri et al., 2012).

## 2 SCOPO DELLA TESI

Il presente lavoro si pone l'obiettivo di approfondire un precedente studio pedologico condotto su suoli in ambiente proglaciale dell'Islanda sui quali è stata condotta un'azione di forestazione a partire da 30/35 anni fa. Le fasi di forestazione sono state 3 in aree contigue: la prima avvenuta 6/7 anni fa, la seconda è avvenuta circa 20 anni fa e la terza 30/35 anni fa. Per lo studio sono stati aperti 2 profili per ogni area con lo scopo di investigare lo sviluppo del suolo.

Il precedente lavoro, fatto da Stelluti Davidh, ha affrontato la fase iniziale della pedogenesi valutando le variazioni morfologiche, chimico-fisiche, e mineralogiche dei suoli coinvolti nell'evoluzione ecologica di un progetto di riforestazione che ha interessato l'area di studio.

In questo studio è stata approfondita l'analisi del processo pedogenetico analizzando l'aspetto mineralogica attraverso l'analisi del vetro, l'analisi della potenzialità enzimatica e analisi degli acidi grassi (EL-FAMES).

### 3 MATERIALI E METODI

#### 3.1 AREA DI STUDIO

L'area di studio si trova nel Sud-Est dell'Islanda, tra Hveragerdi e Þorlákshöfn (63°53'57.21" N, 21°25'23.60" O), 45 km a est di Reykjavik e 7 km dalla costa oceanica.

L'area rientra nella zona sismica nella parte occidentale della cinta tra la placca Nordamericana e quella Europea. Questo è evidenziato dalla presenza di numerosi vulcani. In quest'area, Flovenz and Saemundsson (1993), hanno registrato una delle più alte temperature per le zone di distensione (= rift zone), circa 200°C a 1 km di profondità. Questo è indice dell'intensa attività geotermica della parte vulcanica di Hverangerdi. Le eruzioni vulcaniche ricorrono ogni 4/5 anni producendo lava solida e materiale piroclastico (tephra).

Nello specifico l'area di interesse è a 50 m.s.l.m., caratterizzata da precipitazioni medie annuali di 905mm, per lo più nevose, e temperatura media annuale di 2.6°C.

Il contesto territoriale è una pianura islandese dove si ha un sedimento fluviale di materiale composto da detriti glacio-vulcanici, composto principalmente da materiale piroclastico ricco in basalti. I suoli in questione hanno una genesi piuttosto lenta e complessa, per via del clima e dei fattori incidenti quali erosione eolica e sedimentazione di materiale fluviale causato dallo scioglimento estivo dei ghiacciai che provoca l'esondazione del fiume tributario.

La particella forestale, che occupa circa 0.5 ha, è stata divisa in 3 differenti aree, con lo scopo di definire un transetto in accordo con la successione vegetazionale della foresta:

- Area 1: piante perenni, con una scarsa presenza di giovani piante;
- area 2: piante arbustive, con una buona presenza di piante di circa 20 anni di età;
- area 3: area boschiva con presenza di varie specie forestali di circa 35 anni di età.

Nella prima area abbiamo diverse specie erbacee, sia annuali che poliennali come *Festuca vivipara*, *Empetrum nigrum*, *Gallium spp.*, *Equisetum arvense*, *lichens*, *Rumex acetosa*, *Taraxacum spp.* Oltre alle specie erbacee sono presenti sporadicamente individui di circa 6/7 anni di *Betulla pubescens* e *Pinus contorta*, con altezze che variano dai 55 ai 160 cm. È stata segnalata anche presenza di muschi.

Nella seconda area abbiamo una vegetazione prevalente di *Columna vulgaris*, muschi, *Poa pratensis*, *Erica tetralix*, licheni fogliosi, *Equisetum arvense*, *Taraxacum spp.*, *Vaccinium iliginosum*. Le specie arboree sono *Betula pubescens*, di 20/30 anni con un'altezza che varia dai 180 ai 380 cm, *Pinus contorta*, *Sorbus acuparia* (variano dai 210 ai 240 cm di altezza), *Salix alaxensis* (dai 280 ai 280 cm), *Populus trichocarpa*, *salix phylicifolia*.

La terza area ospita muschi, *Equisetum arvensis*, *poa pratensis*, licheni fogliosi, svariati funghi oltre a specie arboree come *Betulla spp.*, *Betulla pubescens* di 30/35 anni, *Salix alaxensis* e *Acer spp.*

Nel settembre 2019, per ogni area sono stati aperti 2 profili fino alla profondità di 60/70 cm, per un totale di 6 profili. Gli orizzonti genetici identificati sono stati descritti in accordo con Schoenberger et al. (2012). Ogni orizzonte genetico è stato campionato, prelevando circa 3kg di materiale in sacchetti di plastica.

La maggior parte dei profili ha mostrato la presenza di materiale Löss e sedimenti glacio-vulcanici. In prossimità dell'area di studio state individuate Roche Moutonnée (**Figura 15**).



**Figura 15** Roche Moutonnée Un poggio roccioso con un pendio leggermente inclinato e liscio verso l'alto a causa dell'abrasione glaciale e un ripido e accidentato pendio verso il basso a causa della spiumatura glaciale. Fonte: [www.swisseduc.ch](http://www.swisseduc.ch)

## 3.2 STATO DELL'ARTE

### 3.2.1 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI E ANALISI

I campioni di suolo, una volta portati in laboratorio sono stati fatti asciugare all'aria e setacciati con maglia di 2mm. Il pH è stato determinato con una misurazione potenziometrica in acqua con un rapporto solido: liquido (p:v) di 1:8 per gli orizzonti organici e 1:2.5 per gli orizzonti organo-minerali e/o minerali.

Il contenuto totale di carbonio organico (TOC) è stato stimato mediante metodo Walkley Black, riscaldando la sospensione a 180°C per 30 min (Nelson e Sommers, 1996).

La tessitura è stata determinata mantenendo varie quote di 20g di campione immerse in acqua distillata per 24 ore a temperatura ambiente con un rapporto solido:liquido (p:v) di 1.25. È stato usato questo leggero pretrattamento per preservare nel miglior modo possibile lo stato di aggregazione delle particelle. La sabbia è stata setacciata a 1, 0.25 e 0.05 mm per separare rispettivamente le frazioni sabbia grossa, media e fine. La sabbia è stata separata dalle argille tramite sedimentazione mantenendo le colonne a 19-20 °C per 24 ore.

La composizione mineralogica di ogni campione è stata analizzata attraverso diffrazione a raggi X (Philips PW 1830), con radiazione Co K $\alpha$ 1 Fe-filtrata (35 Kv and 25mA). È stato usato un passo di 0,02°2 $\theta$  con una velocità di scansione di 1 secondo per passo. La composizione mineralogica è stata determinata identificando i minerali sulla base dei loro picchi caratteristici (Brindley and Brown 1980)

### 3.2.2 ANALISI FISICHE

Le proprietà fisiche sono state analizzate mediante separazione della sabbia, limo e argilla. I risultati espressi in Tabella 4 mostrano che la frazione granulometrica predominante in tutti e 6 gli orizzonti è la sabbia che rappresenta più del 90% del totale, con una leggera presenza di limo e una quantità trascurabile, se non assente di argilla. Questo sta ad indicare che il suolo è giovane, presumibilmente perché soggetto a successive esondazioni del fiume tributario. Inoltre, la bassa temperatura media annuale del sito (2.6°C), rallenta il processo pedogenetico, con conseguente sviluppo ridotto del suolo.

**Tabella 4**– Distribuzione delle particelle su base granulometrica di un transetto vegetazionale a Hveragerdi, sud dell'Islanda.

Profilo	Orizzonte	Classe gralunometrica	Sabbia	Limo	argilla
			g kg <sup>-1</sup>		
1	A	Sabbioso	991	9	0
	2Cb	Sabbioso	998	2	0
	3Bh1	sabbioso	924	76	0
	3Bh2	Sabbioso franco	844	152	4
1BIS	A	sabbioso	996	4	0
	2Cb	Sabbioso	998	2	0
	3Bwb	Sabbioso	951	49	0
	4Cb	Sabbioso	981	19	0
2	A	Sabbioso	989	11	0
	2Cb	Sabbioso	987	13	0
	3Bh	Franco sabbioso	675	318	7

2BIS

A	Sabbioso	995	5	0
C	Sabbioso	975	25	0
2Bh	Sabbioso franco	734	264	2

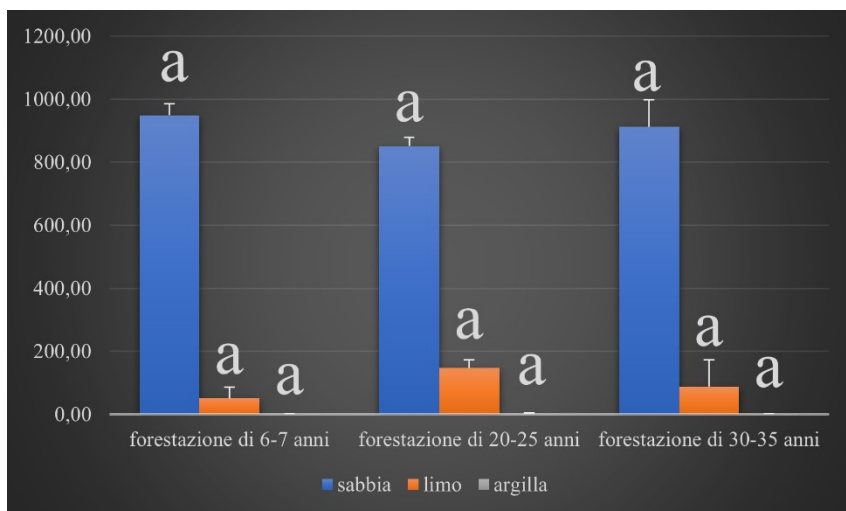
3

A	Sabbioso	986	14	0
Bw	Sabbioso	968	31	1
2Bh	Sabbioso franco	796	203	1

3BIS

A	Sabbioso	983	17	0
Bw	Sabbioso	982	18	0
2Bwb1	Sabbioso	954	45	1
3Bwb2	Sabbioso	970	29	1

In **Figura 16** è mostrato il risultato della tessitura riportato tramite valore medio dei 2 profili per area del transetto, con annessa un'analisi statistica che indica che non ci sono differenze statisticamente significative.



**Figura 16** contenuto in sabbia, limo e argilla nelle tre aree del transetto



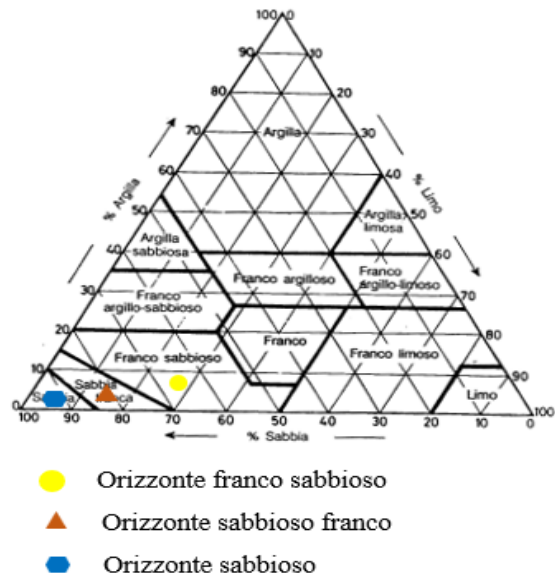


Figura 17 triangolo della tessitura per evidenziare le classi dei suoli nel transetto.

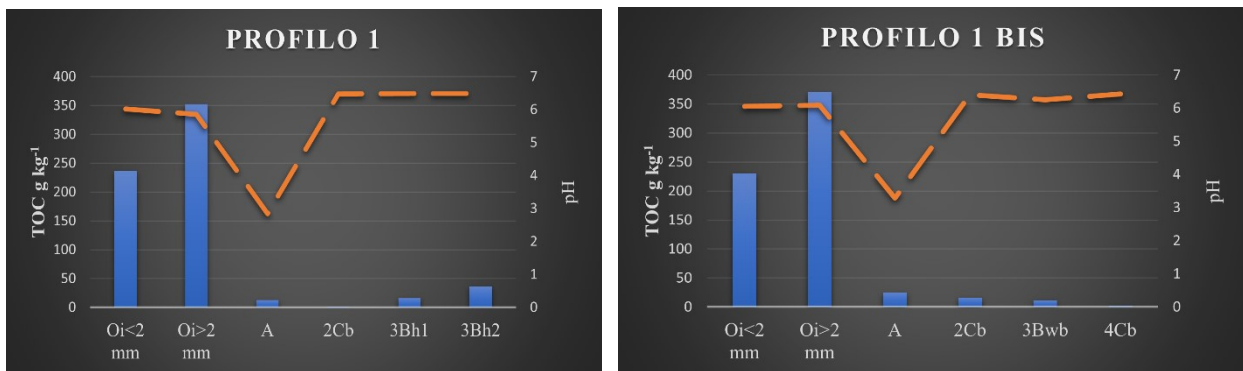
### 3.2.1 ANALISI CHIMICHE

La **Tabella 5** mostra il contenuto di TOC per ogni orizzonte. Per le analisi chimiche, l'orizzonte Oi è stato setacciato a 2 mm e le analisi sono state fatte separatamente sulle 2 frazioni ottenute (Oi < 2mm e Oi > 2mm).

**Tabella 5**– Risultato delle analisi chimiche lungo un transetto vegetazionale a Hveragerdi, Sud dell'Islanda.

Area	Profilo	Orizzonte	pH	TOC g kg <sup>-1</sup>	
Forestazione di 6-7 anni	1	Oi<2 mm	6.02	236.05	
		Oi>2 mm	5.86	352.59	
		A	2.84	12.29	
		2Cb	6.48	1.02	
		3Bh1	6.49	15.96	
		3Bh2	6.49	35.78	
	1BIS	Oi<2 mm	6.05	230.12	
		Oi>2 mm	6.09	370.37	
		A	3.29	24.77	
		2Cb	6.41	15.96	
		3Bwb	6.25	11.56	
		4Cb	6.43	2.43	
	Forestazione di 20-25 anni	2	Oi<2 mm	5.92	234.07
			Oi>2 mm	5.80	348.64
A			6.09	24.60	
2Cb			6.70	0.55	
3Bh			6.35	42.75	
2 BIS		Oi<2 mm	6.45	162.96	
		Oi>2 mm	5.85	269.63	
		A	6.21	8.62	
		C	6.72	3.37	
		2Bh	7.02	43.08	
Forestazione di 30-35 anni	3	Oi<2 mm	6.16	62.22	
		Oi>2 mm	6.15	184.69	
		A	6.12	7.99	
		Bw	6.48	6.11	
		2Bh	6.63	41.83	
	3BIS	Oi<2 mm	6.18	68.15	
		Oi>2 mm	5.96	204.44	
		A29	6.15	18.33	
		Bw	6.51	4.23	
		2Bwb	6.59	5.80	
		3Bwb	6.78	2.27	

In **Figura 18** troviamo la rappresentazione grafica della **Tabella 5** per capire meglio le variazioni e i trend dei 2 parametri in questione. Nella prima area, i profili 1 e 1 Bis (**Figura 18**), il carbonio organico è maggiore nell'orizzonte Oi, specialmente nella frazione >2mm ( $350 \text{ g kg}^{-1}$ ). Negli orizzonti più profondi sono stati trovati minor quantitativi di Corg, circa  $15 \text{ g kg}^{-1}$  (il valore massimo è stato di  $35 \text{ g kg}^{-1}$  in 3Bh2 e un valore minimo di  $1.02 \text{ g kg}^{-1}$  in Cb, entrambi nel profilo 1). Nel profilo 1 si può notare che l'andamento del contenuto di carbonio organico non decresce regolarmente lungo il profilo per via della presenza di orizzonti 3Bh1 e 3Bh2 con rispettivi contenuti di carbonio organico di  $15.96$  e  $35.78 \text{ g kg}^{-1}$ , più alti rispetto ai contenuti in carbonio organico degli orizzonti A e Cb dello stesso profilo (rispettivamente  $12.29$  e  $1.02 \text{ g kg}^{-1}$ ), come mostrato in Figura 18. Il pH è sub-acido per l'intero profilo, variando da 6.5 a 6.0, con l'eccezione per l'orizzonte A che è fortemente acido, 2.84 nel profilo 1 e 3.29 nel profilo 1 BIS.



**Figura 18** Variazioni di pH e TOC lungo il profilo 1 e 1 BIS

Nell'area dominata da vegetazione arbustiva il carbonio organico varia da  $200 \text{ g kg}^{-1}$  a  $350 \text{ g kg}^{-1}$  per l'orizzonte Oi: L'orizzonte 2Cb del profilo 2, e gli orizzonti A e C del profilo 2 BIS hanno un valore molto basso di TOC,  $0.55$ ,  $8.62$  e  $3.37 \text{ g kg}^{-1}$  rispettivamente. Gli orizzonti Bh sono caratterizzati da un alto valore di carbonio organico rispettivamente di  $42.75 \text{ g kg}^{-1}$  per l'orizzonte 3Bh del profilo 2 e  $43.08 \text{ g kg}^{-1}$  nell'orizzonte 2Bh del profilo 2BIS. Il pH dell'orizzonte Oi è leggermente inferiore al profilo 2 rispetto al profilo 2 BIS.

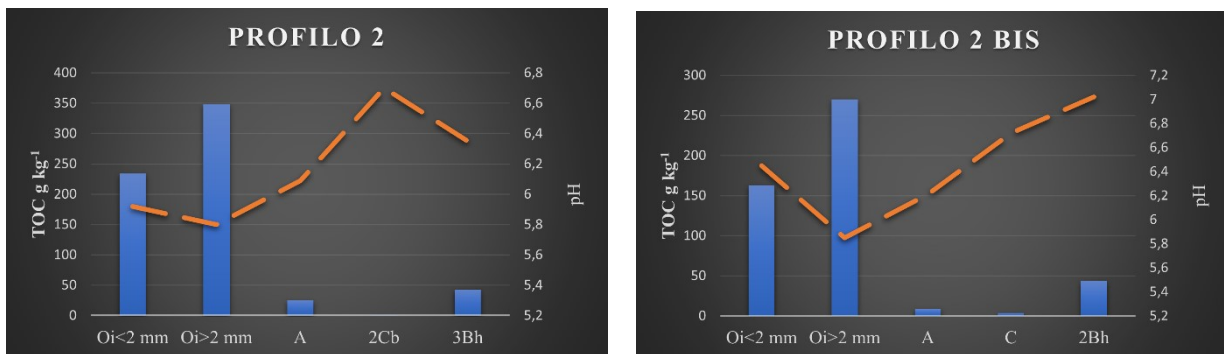


Figura 19 Variazioni di pH e TOC lungo il profilo 2 e 2 BIS

Il carbonio organico nel profilo 3 e 3BIS dell'area caratterizzata da vegetazione prevalentemente arborea è di 62.22 e 68.15 g kg<sup>-1</sup> rispettivamente per la frazione dell'Oi< 2 mm, mentre per la frazione dell'Oi< 2 mm il carbonio organico è di 184.69 e 204.44 g kg<sup>-1</sup>. Un discreto contenuto di carbonio organico è stato rilevato nell'orizzonte 2Bh con un contenuto di 41.83 g kg<sup>-1</sup>. Negli altri orizzonti il TOC è decisamente minore, per il 3 con un valore minimo nell'orizzonte 3Bwb del profilo 3BIS (2.27 g kg<sup>-1</sup>) e un massimo di 6.11 g kg<sup>-1</sup> nell'orizzonte Bw del profilo 3. Il pH è intorno a 6 per l'Oi e leggermente maggiore per gli altri orizzonti **Figura 20**

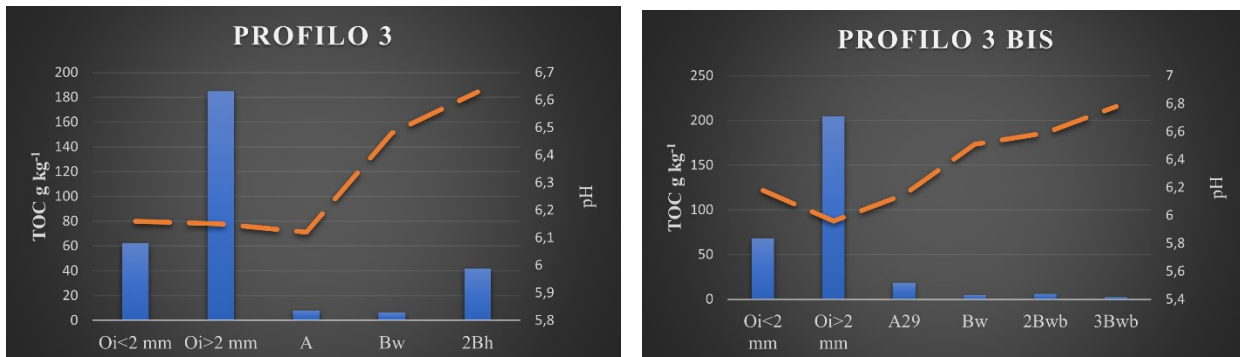
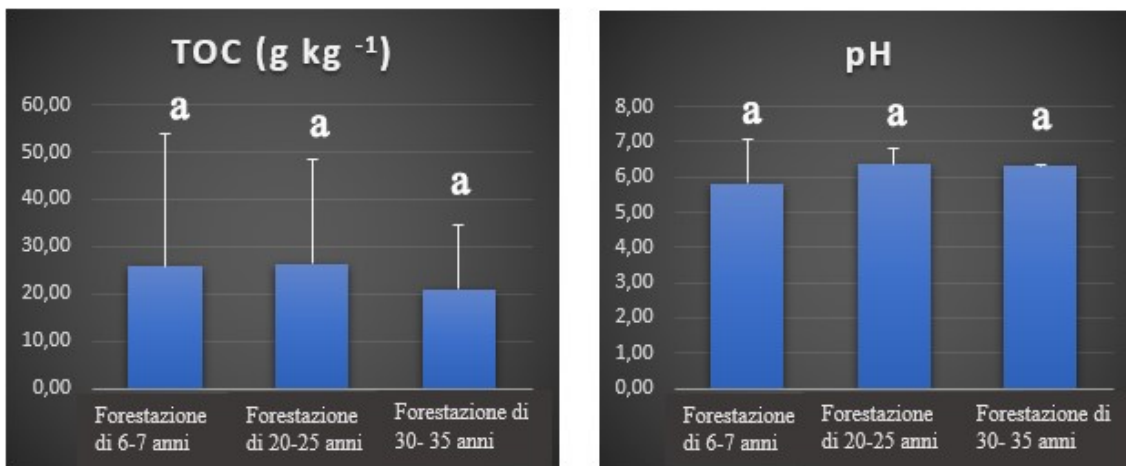


Figura 20 Variazioni di pH e TOC lungo il profilo 3 e 3 BIS

Dai risultati ottenuti è evidente che non esistono differenze lungo il transetto vegetazionale in termini di TOC e pH, come confermato dall'analisi statistica riportata in **Figura 21**.



**Figura 21** Rappresentazione grafica delle differenze statistiche lungo il transetto vegetazionale.

Anche il contenuto in carbonio non ha differenze statisticamente significative lungo il transetto vegetazionale, il minor contenuto nel suolo minerale è nella terza area con vegetazione arborea. L'ipotesi è sulla capacità di questo suolo di evolversi, per via del substrato vulcanico e le dure condizioni ambientali. La successione dei giovani alberi, di cui l'età stimata è di circa 30 anni, non ha l'abilità di accumulare carbonio in maniera tale da indurre cambiamenti nelle proprietà del suolo, che probabilmente richiederebbe decenni (Einarsson, 1984).

### 3.3 ANALISI DI LABORATORIO

#### 3.3.1 ANALISI DEL VETRO

Per determinare il contenuto di vetro nei vari orizzonti, il campione è stato sottoposto a trattamento termico e successivamente a successivi attacchi con soda (NaOH) 0,5 M portata ad ebollizione.

Procedimento:

Pesati 5 g di campione, sono stati messi in muffola a 105° C per 4 ore, al fine di asciugarli. In seguito, il campione è stato inserito in muffola a 300°C per 6 ore, con lo scopo di eliminare la sostanza organica, e portato successivamente a 500 °C per 6 ore al fine di amorfizzare il vetro. Prima e dopo ogni trattamento termico il campione è stato pesato in modo da registrarne le variazioni.

Il campione trattato termicamente è stato finemente triturato al fine di aumentare il più possibile la superficie specifica del materiale.

Terminato il trattamento termico, sono stati prelevati 2g di campione sono stati trasferiti in beuta da 250 ml, alla quale sono stati aggiunti 20 ml di NaOH 0.5M.

La sospensione è portata ad ebollizione, mediante l'uso di piastre riscaldanti e mantenuta costantemente in stato di ebollizione e leggera agitazione per 15' minuti.

Questo processo è stato ripetuto 3 volte aggiungendo ad ogni ripetizione 20 ml di NaOH 0,5M.

Terminato l'attacco con la soda, la sospensione è stata trasferita in provette da 50 ml, diluendola con acqua distillata q.b.

La sospensione ottenuta è stata centrifugata per 7 min a 4000 rpm, con lo scopo di separare la fase solida da quella liquida, e quest'ultima rimossa. Il campione è stato poi sottoposto a successivi lavaggi al fine di eliminare la soda in eccesso.

Il campione è stato asciugato in stufa a 50°C per 48h e poi pesato al fine di ottenere il peso secco del campione.

### 3.3.2 DETERMINAZIONE DELLE ATTIVITÀ ENZIMATICHE

La funzione delle comunità microbiche nei suoli è stata valutata analizzando le attività potenziali di sei enzimi microbici extracellulari.

Le attività enzimatiche sono state misurate con il metodo fluorimetrico secondo Marx et al. (2001) e Vepsäläinen et al. (2001), utilizzando il metodo dei substrati di metilumbelliferil fluorogenico (MUF).

Gli enzimi studiati sono coinvolti nei cicli biogeochimici di C, N, P e S (Nannipieri et al., 2012). Sono stati analizzati:  $\beta$ -cellobioidrolasi = cellulasi (CELL; EC 3.2.1.91), N-acetil- $\beta$ glucosaminidasi = chitinasi (CH; EC 3.2.1.30),  $\beta$ -glucosidasi (BG; EC 3.2.1.21),  $\alpha$ -glucosidasi (AG; EC 3.2.1.20, acido fosfomonoesterasi= fosfatasi (PHO; EC 3.1.3.2),  $\beta$ -ossidasi = xilosidasi (Xylo; EC 3.2.2. 27) arilsulfatasi = sulfatasi (Aryl; EC 3.1.6.1) butirrato esterasi = butirrato (BUT; EC 3.1.1.1), leucina-aminopeptidasi = leucina (LAP; EC 3.4.11.1).

I substrati sono stati preparati con tampone Na-acetato 0.5M pH 5,5. 100 $\mu$ l di soluzione di substrato 1 mM sono stati aggiunti raggiungendo una concentrazione di 500 $\mu$ M.

Il substrato di leucina aminopeptidasi è stato preparato utilizzando Trizma HCl 0.05 M pH 7.5.

Prima di iniziare l'analisi, tutti i campioni di terreno sono stati regolati al 60% di capacità di tenuta dell'acqua e mantenuti a 25 ° C per 3 giorni al buio.

La sospensione è stata ottenuta omogeneizzando 2 g di massa secca di terreno fresco con 50 ml di acqua sterile in un becker da 100 ml dove, tramite l'uso di un agitatore magnetico, è stata mantenuta in agitazione per 5 min a 150rpm; dalla sospensione, mantenuta in agitazione, sono stati prelevati 50 $\mu$ l e dispensati in una micropiastra nera a 96 pozzetti (3 campioni analitici replica X campioni X substrato). Le micropiastre sono state coperte e incubate al buio a 25°C per 3 h.

La fluorescenza è stata quantificata utilizzando un fluorimetro micropiastra (Fluoroskan Ascent) con eccitazione a 360 nm, filtri di emissione a 450 nm.

Le letture sono state eseguite dopo 0, 30, 60, 120, 180 minuti.

I risultati sono espressi come nmoli di prodotto (MUF o AMC) di ogni reazione enzimatica rilasciata per g di suolo per unità di tempo, in relazione ad una curva standard preparata con concentrazioni crescenti di MUF o AMC e incubata alle stesse condizioni sperimentali.

Il SEI (Synthetic Enzymatic Index), è stato calcolato sommando i valori di tutte le attività enzimatiche ( $\beta$ -glucosidasi,  $\alpha$ -glucosidasi,  $\beta$ -xilosidasi,  $\beta$ -cellobioidrolasi, N-acetil- $\beta$ glucosaminidasi, leucina aminopeptidasi, acido fosfomonoesterasi, arilsulfatasi, butirrato esterasi

L'Indice Enzimatico Sintetico per il ciclo C (SEIc) è stato calcolato sommando il valore delle attività enzimatiche di  $\beta$ -glucosidasi,  $\alpha$ -glucosidasi,  $\beta$ -xylosidasi,  $\beta$ - cellobioidrolasi, N-acetil- $\beta$ glucosaminidasi.



### 3.3.3 DETERMINAZIONE DEI FOSFOLIPIDI DI MEMBRANA

La struttura della comunità microbica è stata caratterizzata attraverso l'analisi degli esteri metilici degli acidi grassi (EL-FAME), utilizzando il metodo della transesterificazione.

(Schutter & Dick, 2000) La metanolisi alcalina permette di estrarre gli acidi grassi esterificati (EL) ma in queste condizioni non è in grado di esterificare gli acidi grassi liberi (Schutter & Dick, 2000). Per l'estrazione sono stati aggiunti 16,6 ml di idrossido di potassio 0.2 M in metanolo e 5 µl di soluzione di standard interno (0.023 mg ml<sup>-1</sup> metilnonadecanoato 19:0) in una provetta da centrifuga da 50 ml contenente 5 g di terreno congelato.

Le provette sono state poi incubate a 37 °C per 1 h in agitatore orbitale.

In seguito, 6,6 ml di acido acetico 1.0 M sono stati aggiunti per neutralizzare il pH del contenuto della provetta. Gli EL-FAME sono stati estratti aggiungendo 10 ml di esano.

La miscela è stata mescolata vigorosamente e centrifugata a 4500 rpm (2037.55 G) per 15 min. Lo strato di esano è stato trasferito in un tubo di vetro pulito, disidratato con solfato di sodio, filtrato ed evaporato sotto un vapore di N<sub>2</sub>. Alla fine, i FAME sono stati sciolti in 200 µl di dicloremetano e quantificati in GC-MS. Gli spettri di massa sono stati registrati, con l'uso di uno spettrometro QP-5050 (Shimadzu, Giappone) dotato di una colonna capillare AT 20 (0.25 mm d.i., 25 m) (Alltech, Deerfield).

Gli acidi grassi metilati sono stati identificati in base al loro spettro di massa e utilizzando BAME 24 (47080 U) e 37 FAME Mix (47885-U, Sigma-Aldrich) come standard chimici.

I dati sono stati espressi come quantità relativa, calcolata come l'area di ciascun picco EL-FAME rispetto all'area sommata di tutti i picchi EL-FAME.

Il metilnonadecanoato, C19:0, a concentrazioni note, è stato usato come standard interno. Dalle 2 repliche campionarie sono state prelevate 2 aliquote di egual misura, le quali sono state estratte in doppio.

È stata usata la nomenclatura standard per descrivere i FAMEs, che sono designati dal numero totale di atomi di carbonio/numero di doppi legami, seguita dalla posizione del doppio legame dall'estremità metil (alifatico) (ω) della molecola.

I prefissi “a” e “i” si riferiscono ai FAMEs anteiso- e iso- rappresentati. Il prefisso “10Me” indica un gruppo metilico sul decimo atomo di carbonio dall'estremità carbossilica della molecola e “cy” indica i FAMEs ciclopropano.

I gruppi microbici sono stati assegnati agli acidi grassi legati all'estere (EL-FAME) secondo Fierer et al., (2003) e Frostegård et al., (1993 A, B).

### 3.4 ANALISI STATISTICA DEI DATI

L'analisi della varianza (ANOVA) è stata eseguita, attraverso l'ausilio del software R (R core team, 2013) al fine di investigare differenti stadi di pedogenesi su un transetto di suolo sviluppato su sedimenti glacio-fluviali. Gli assunti di applicabilità dell'analisi ANOVA (distribuzione normale dei dati e l'omoschedasticità della varianza) sono stati testati.

In caso di dati non parametrici (distribuzione non normale e/o eterogeneità della varianza), ogni variabile numerica è stata trasformata secondo la procedura di Box e Cox (1964).

Gli assunti di applicabilità dell'analisi sono stati poi verificati sui residui delle variabili trasformate attraverso il test statistico di Shapiro-Wilk (pacchetto "stats") e il test di Levene (pacchetto "car"), entrambi con un livello di significatività del 5%.

Nel caso di distribuzione non normale dei dati, il test di Kruskal-Wallis è stato eseguito per valutare eventuali differenze significative. Nel caso di eteroschedasticità dei dati trasformati, è stato applicato il test Welch one-way ANOVA.

Il test ANOVA è considerato significativo con  $p \leq 0.05$ ; le differenze tra le medie sono state indagate con il test Tukey's Honest Significant Difference (HSD) con  $p \leq 0.05$ .

## 4 RISULTATI E DISCUSSIONI

### 4.1 RISULTATI

#### 4.1.1 ANALISI MORFOLOGICA



*Figura 22* Foto dei 6 profili. Profilo 1/1bis: età di forestazione 6/7 anni. Profilo 2/2 bis: età di forestazione 20 anni. Profilo 3/3 bis età di forestazione di 30/35 anni.

La **Figura 22** mostra i profili di suolo lungo il transetto.

L'orizzonte O ha uno spessore medio di 8 cm, con uno spessore minimo nell'area arbustiva. L'orizzonte organico è seguito da un orizzonte A meno spesso (circa 5 cm). Più in profondità abbiamo del materiale derivato da sedimentazione fluviale e depositi di materiale eolico, che si evidenzia dalla presenza di orizzonti Bw, BC e C provenienti da fonti diverse che hanno trasportato il materiale parentale su cui si sta sviluppando il suolo. Nel profilo 1 e 1 BIS sono presenti 4 variazioni della litologia (2Cb,3Bwb,4Cb, 5CBw). La successione degli orizzonti mostra chiaramente che la pedogenesi è iniziata, poi è stata interrotta, ogni volta che arrivava nuovo materiale che si depositava sulla superficie. Particolarmente gli orizzonti 3Bwb1 e 3Bwb2, del profilo 1, sono caratterizzati dalla presenza di materiale eolico. In quest'area il suolo presenta una profondità di 65/75 cm.

Nell'area di 20/25 anni di forestazione, il profilo 2 e 2 BIS mostrano una successione di materiale derivato dalla reiterata sedimentazione di materiale fluviale. La profondità del suolo vai dai 50 ai 60 cm.

Nell'ultima area del transetto, con piante arboree di 30/35 anni, il profilo 3 e il 3 BIS raggiungono una profondità di 60/70 cm, anche in questo caso si evidenzia la successione di materiale di origine eolica con un minor impatto dei sedimenti fluviali, in confronto agli altri profili.

Dall'analisi morfologica è emersa la presenza di orizzonti Bh (sombrio) nei profili 1, 2, 2BIS e 3 caratterizzati da un basso value e/o chroma in confronto agli orizzonti superiori, addirittura il Bh risulta essere più scuro degli orizzonti organici.

È stata rilevata la presenza di un orizzonte ghiacciato riconducibile a permafrost nei profili 2BIS, 3 e 3BIS. Pertanto, il suolo è classificabile, in accordo con la Soil Taxonomy, in quanto il permafrost si trova a una profondità inferiore ai 100cm. Il gruppo di appartenenza è Orthels in quanto non è presenza di crioturbazioni e non c'è materiale organico con più di 40 cm di spessore.

**Table 1.** morfologia di un transetto vegetazionale a Hveragerdi, sud Islanda. Codici in accord con Schoeneberger et al. (2002). Per i simboli leggere la legenda.

Parent material: sedimento fluviale di materiale piroclastico di natura basaltica rielaborato da ghiacciaio.

Climate (da serie storica di 3 anni): temperature media annuale 2.6°C; precipitazioni medie annuali 970 mm.

Nell'intorno presenza di affioramenti rocciosi e *roches moutonnées*.

#### Forestazione di 6-7 anni

Hveragerdi: profilo 1 (alberi sporadici)

Vegetazione. Alberi: *Betula pubescens*, *Pinus contorta* (altezza 55-160 cm); Arbusti: *Empetrum nigrum* L., *Calluna* spp.;

Erbacee, *Gallium* spp., *Equisetum* spp., *Rumex* spp., graminoidi, *Taraxacum* spp. Altro: licheni fogliosi, muschi

Copertura del suolo: 100%.

Suolo: Glacis Psammorheths, sandy mixed, frigid (SSS, 2014).

Orizzonte	profondità cm	Spessore medio cm	Colore <sup>a</sup>	Struttura <sup>b</sup>	Consistenza <sup>c</sup>	Radici <sup>d</sup>	Confini <sup>e</sup>	Osservazioni
Oi	8-0	7-11	5YR 3/4	-	-	3 mi,vf; 2 f; 1 m	cw	
A	0-6	5-8	5YR 2.5/1	2 f gr	fr	3 mi,vf,f; 1 m	cw	
2Cb	6-26	16-21	2.5YR 3/2	sg	fr	1 mi,vf,f	cw	
3Bh1	26-49	22-25	2.5YR 3/2	2-3 tk pl	fr	1 mi,vf; 2 f	dw	loess
3Bh2	49-72	21-25	2.5YR 2.5/3	2-3 tk pl	fr	1mi, vf	cw	loess
C	72-74+	-	2.5YR 3/2	sg	fr	0	-	

Hveragerdi: profilo 1bis (alberi sporadici)

Vegetazione. Alberi: *Betula pubescens*, *Pinus contorta* (altezza 55-160 cm); Arbusti: *Empetrum nigrum* L., *Calluna* spp.; Erbacee:, *Gallium* spp., *Equisetum* spp., *Rumex* spp., graminoidi, *Taraxacum* spp. Altro: licheni fogliosi, muschi

Copertura del suolo: 100%.

Suolo: Glacis Psammorheths, sandy mixed, frigid (SSS, 2014).

Oi	10-0	8-12	5YR 3/4	-	-	3 mi,vf,f	cw	
A	0-5	4-7	2.5YR 3/2	2 f gr	fr	3 mi,vf,f	cw	
2Cb	5-17	12-17	2.5YR 3/2	sg	fr	1 mi,vf,f	cw	
3Bwb	17-41	22-25	2.5YR 3/2	2-3 m-tk pl	fr	2 mi,vf,f	cw	loess
4Cb	41-62	23-29	5YR 2.5/1	sg	fr	1 mi,vf,f	cw	
5CB	62-65+	-	2.5YR 3/2	sg	fr	0	-	

### Forestazione di 20/25 anni

Hveragerdi: profilo 2

Vegetazione: Arboree: *Betula pubescens* (2-3 m), *Pinus contorta*, *Sorbus aucuparia* (2.1 m-2.4 m), *Salix alaxensis* (1.1-2.8m), *Populus trichocarpa*, *Salix phylicifolia*. arbustive: *Vaccinium myrtillus*. Erbacee: *Poa pratensis*, *Equisetum* spp., *Taraxacum* spp.. Altro: muschi, licheni fogliosi.

Copertura del suolo: 100%.

Suolo: Glacic Psammorhetls, sandy mixed, frigid (SSS, 2014).

Orizzonte	profondità	Spessore medio	Colore <sup>a</sup>	Struttura <sup>b</sup>	Consistenza <sup>c</sup>	Radici <sup>d</sup>	Confini <sup>e</sup>	Osservazioni
	cm	cm						
A	0-3	2-3	5YR 3/2	sg - 1 m sbk	fr	3 mi,vf,f	cw	
2Cb	3-25	21-23	5YR 2.5/1	sg - 1 m sbk	fr	3 mi,vf; 2 f; 1m	cw	
3Bh	25-49	23-27	5YR 3/3	2-3 m,tk pl	fr	1 mi,vf,f	as	
4R	49-51+	-	-	-	-	-	-	

Hveragerdi: profilo 2bis

Vegetazione: arborea: *Betula pubescens*, *Pinus contorta*, *Sorbus aucuparia*, *Salix alaxensis*, *Populus trichocarpa*, *Salix phylicifolia*. Arbustiva: *Vaccinium myrtillus*. erbacea: *Poa pratensis*, *Equisetum*, *Taraxacum* spp.. Altro: muschi e licheni

Copertura del suolo: 100%.

Suolo: Glacic Psammorhetls, sandy mixed, frigid (SSS, 2014).

Oi	6-0	5-8	5YR 3/4	-	-	2 vf,f	cw	
A	0-7	5-8	5YR 3/2	2 f gr	fr	2 mi,m,f	cw	
C	7-34	25-29	5YR 2.5/1	sg	fr	2 mi,vf; 1,2 f	cw	
2Bh	34-60	25-29	5YR 3/3	2 m pl	fr	1 mi,vf; 2 f	cw	thyxotropic
3Cf	60-65+	-	5YR 3/3	2 m pl	fr	0	-	loess

**Forestazione di 30/35 anni**

Hveragerdi: profilo 3

Vegetazione: Arborea: *Betula pubescens*, *Salix alaxensis*, *Acer* spp. Erbacea, *Equisetum* spp, *Poa pratensis*, Altro: muschi, licheni fogliosi. Funghi: *Boletus* spp.

Copertura del suolo: 100 %.

Suolo: Glacic Psammorhethels, sandy mixed, frigid (SSS, 2014).

Orizzonte	profondità	Spessore medio	Colore <sup>a</sup>	Struttura <sup>b</sup>	Consistenza <sup>c</sup>	Radici <sup>d</sup>	Confini <sup>e</sup>	Osservazioni
	cm	cm						
A	0-4	4-7	5YR 2.5/2	2-3 f abk-sbk & gr	fr	3 mi,vf; 2 f,m	cw	
Bw	4-29	22-26	5YR 3/3	1-2 f,m gr & sbk	fr	2 mi,vf,f; 1 m	cw	
2Bh	29-60	28-32	5YR 3/3	2 f,m gr & sbk	fr	1 mi,vf,f	cw	loess
3Cf	60-62+	-	5YR 3/3	-	-	0	-	

Hveragerdi: profilo 3 bis

Vegetazione: Arborea: *Betula pubescens* (4.9-6 m), *Salix alaxensis* (6-7.5m), *Acer* spp. Erbacea: *Equisetum* spp., *Poa pratensis*, Altro: muschi, licheni fogliosi.

Funghi: *Boletus* spp.

Copertura del suolo: 100 %.

Suolo: Glacic Haplorthels, sandy mixed, frigid(SSS, 2014).

Oi	7-0	5-8	5YR 3/4	-	-	-	cw	
A	0-4	4-8	5YR 2.5/2	3 f gr	fr	3 m,vf; 2 f,m	cw	
Bw	4-18	13-16	5YR 2.5/2	2 f,m abk-sbk	fr	2 vf,f; 1 m	cw	
2Bwb1	18-32	13-17	5YR3/2	2 m,tk pl & f,m abk	fr	1 mi,vf; 2 f; 1 m	cw	loess
3Bwb2	32-71	36-42	5YR 2.5/1	sg - 2 f,m abk-sbk	fr	1 mi,vf,f	cw	loess
3Cf	71-73+	-	5YR 3/3	-	-	0	-	

<sup>a</sup>inumidito e schiacciato, in accordo con le tavole Munsell Soil Color Chart (1954 edition).

<sup>b</sup>1'=poco, 1=scarsa, 2=discreta, 3=forte; th=sottile, tk=densa, f=buona, m=media, c=grossolana; abk=blocchi angolari, sbk=blocchi subangolari, pl=piatti; sg=singoli granelli.

<sup>c</sup>m=morbido, fr=fiabile, vfr=molto friabile; w=umido, ss=leggermente appiccicoso.

<sup>d</sup>0=assenti, v1=molto poche, 1=poche, 2=copiose, 3=abbondanti; mi=micro, vf=molto sottile, f=sottile, m=medie, c=spesse.

<sup>e</sup>c=lineare, a=interrotto, d=diffuso; w=ondulato, s=omogeneo, i=irregolare.

#### 4.1.2 RISULTATI ANALISI VETRO

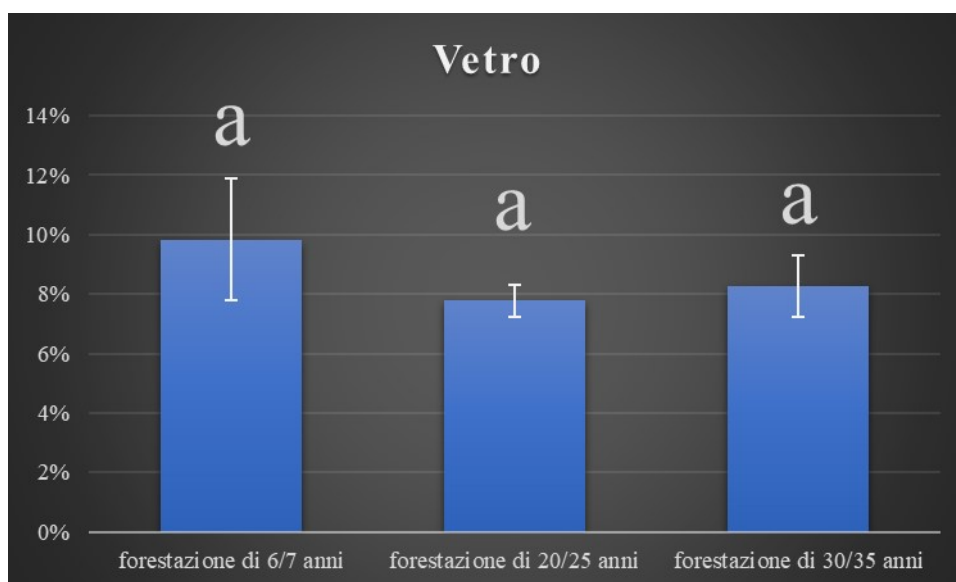
Le Tabelle 4-5-6 riportano i valori medi ottenuti dall'analisi del vetro e della potenzialità enzimatica.

La componente vetrosa risulta essere più alta nella prima area (**Tabella 6**), con valori che oscillano dal 7 al 12% (p/p) rispettivamente negli orizzonti A e 2Cb, mentre gli altri orizzonti mostrano un contenuto che si aggira intorno al 9% p/p.

Nella seconda area (**Tabella 7**), si ha un contenuto di vetro analogo al sito 1 prendendo in considerazione l'orizzonte Cb, mentre gli altri orizzonti hanno contenuti in vetro tra il 4 e il 5% p/p.

Nella terza area (**Tabella 8**) i valori rimangono più o meno costanti lungo tutto il profilo, con contenuti in vetro che oscillano dal 7 al 9 % p/p.

Nel primo transetto, si nota una riduzione della componente vetrosa lungo il profilo, ad eccezione dell'orizzonte Cb. Come mostrato in **Figura 23**, il contenuto di vetro dei diversi siti indagati non mostrano differenze statisticamente significative.



**Figura 23** confronto tra il contenuto in vetro dei 3 transetti



#### 4.1.3 RISULTATI ANALISI POTENZIALITÀ ENZIMATICA

Dall'analisi della potenzialità enzimatica, fatta eccezione per la leucina, non emergono differenze statisticamente significative lungo il transetto (**Tabella 9**), ma si possono identificare delle tendenze. L'area con forestazione 6/7 registra un valore medio di leucina di 1.04 nmol/g\*TB\*h, l'area con forestazione di 20/25 anni 0.42 nmol/g\*TB\*h e l'area con forestazione di 30/35 anni 0.20 nmol/g\*TB\*h.

All'interno del profilo l'attività enzimatica si concentra a livello dell'orizzonte Oi, che si differenzia dal resto degli orizzonti per le elevate potenzialità enzimatiche, che decrescono con la profondità. Osservando unicamente i risultati dell'orizzonte Oi, emergono differenze significative per quanto riguarda l'enzima arylsulfatasi, con valore medio di 28.05 nmol/g\*TB\*h nella prima area, 14.02 nmol/g\*TB\*h nella seconda area e 18.83 nmol/g\*TB\*h nella terza.

Dal confronto dei risultati tra i profili non ci sono differenze statisticamente significative, ma si possono individuare dei trend prendendo come valori di riferimento quelli registrati nell'orizzonte organico. I valori più alti si registrano per gli enzimi fosfatasi, b-glucosidasi e butirrato.

L'enzima fosfatasi tende a diminuire lungo il transetto, passando dall'area forestata di 6/7 anni fino ad arrivare all'area forestata 30/35 anni fa. Esso tocca il picco di 130.31 nmol/ g TB\*h negli orizzonti organici della prima area, dominata dalla vegetazione erbacea, per poi scendere a 115.34 nmol/ g TB\*h negli orizzonti organici della seconda area, dominata da vegetazione arbustiva, arrivando a 94.80 nmol/ g TB\*h nella terza area; negli altri orizzonti non si rilevano variazioni.

L'enzima b-glucosidasi registra il valore più alto, 97.21 nmol/ g TB\*h nell'orizzonte organico della prima area, per poi abbassarsi e rimanere più o meno costante nella seconda e terza area con valori medi registrati negli orizzonti organici di 27.67 e 37.22 nmol/ g TB\*h rispettivamente.

Per l'enzima butirrato si registrano 89.48 nmol/ g TB\*h nell'orizzonte Oi della seconda area, mentre nelle aree con forestazione di 6/7 anni e 30/35 anni, orizzonte Oi, si registrano valori rispettivamente di 149.77 e 149.78 nmol/ g TB\* h.

Anche la leucina sembra avere una tendenza negativa lungo il transetto in quanto si registra un valore medio di 2.97 nmol/ g TB\*h per l'orizzonte Oi dell'area con forestazione di 6/7 anni, un valore medio di 1.70 nmol/ g TB\*h per l'orizzonte Oi dell'area con forestazione 20/25 anni e un valore medio di 0.43 nmol/ g TB\*h per l'orizzonte Oi dell'area con forestazione 30/35 anni.

Gli altri enzimi, cellulasi, chitinasi,  $\alpha$ -glucosidasi, sulfatasi e xylosidasi mostrano contenuti più alti nell'orizzonte Oi dell'area con forestazione di 6/7 anni dominata da vegetazione erbacea. Si registrano valori medi di 17.02 nmol/ g TB\*h per la cellulasi, 29.26 nmol/ g TB\*h per la chitinasi, 14.52 nmol/ g TB\*h per l' $\alpha$ -glucosidasi, 28.05 nmol/ g TB\*h per la sulfatasi e 15.72 nmol/ g TB\*h per lo xylosidasi.

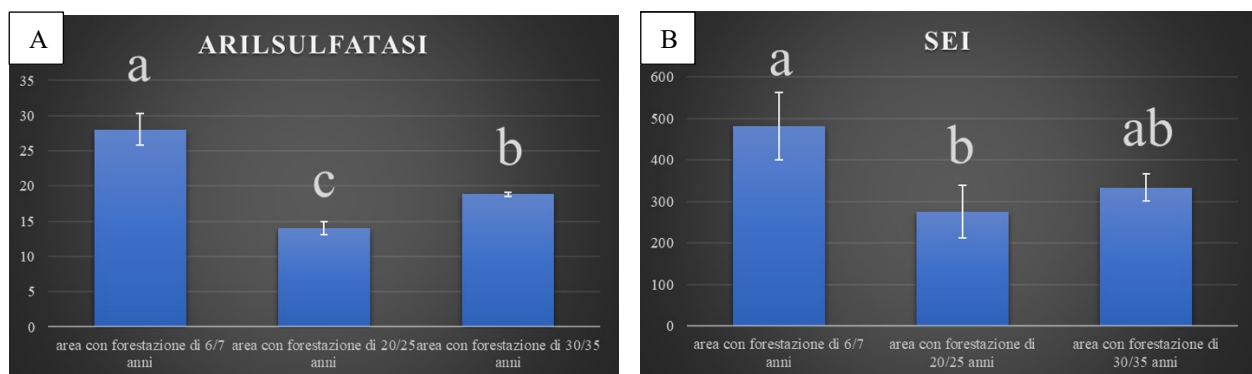
Nella seconda area con forestazione di 20/25 anni si registrano valori medi per l'orizzonte Oi di 9.74 nmol/ g TB\*h per la cellulasi, 13.29 nmol/ g TB\*h per la chitinasi, 5.96 nmol/ g TB\*h per l' $\alpha$ -glucosidasi, 14.02 per la sulfatasi e 5.84 nmol/ g TB\*h per la xylosidasi.

Nella terza area con forestazione di 30/35 anni i valori non si discostano da quelli della seconda area, qui infatti si registrano valori medi dell'orizzonte organico di 8.19 nmol/ g TB\*h per la cellulasi, 13.91 nmol/ g TB\*h per la chitinasi, 7.38 nmol/ g TB\*h per l' $\alpha$ -glucosidasi, 14.02 nmol/ g TB\*h per la sulfatasi e 6.89 nmol/ g TB\*h per la xylosidasi.

Come mostrato in **Figura 24-B**, dove si riporta il confronto del Sintetic Enzimatic Index tra le tre aree del transetto, non si osservano differenze statisticamente significative, ma si può notare una differenza tra il SEIc dell'area forestata 6/7 anni fa, rispetto alle altre 2 aree.

Osservando le differenze unicamente nell'orizzonte Oi emergono differenze significative per quanto riguarda l'enzima arylsulfatasi, e il SEI.

L'enzima sulfatasi (**Figura 24-A**) registra valori medi di 28.05 nmol/g\*TB\*h nella prima area, 14.02 nmol/g\*TB\*h nella seconda area e 18.83 nmol/g\*TB\*h nella terza. Il SEI, come mostrato graficamente in Figura 24-B, invece registra valori medi di 481 nmol/g\*TB\*h nella prima area, 275.52 nmol/g\*TB\*h nella seconda area e 334.00 nella terza.



**Figura 24** A) confronto dell'arilsulfatasi tra gli orizzonti Oi lungo il transetto; B) confronto del SEI (Synthetic Enzimatic Index) tra gli orizzonti Oi lungo il transetto.

**Tabella 6** Analisi del vetro e delle potenzialità enzimatiche prima area con vegetazione di 6/7 anni.

orizzonte	vetro	SEI	SEIc	cellulasi	chitinasi	b_glucosidasi	a_glucosidasi	fosfatasi	sulfatasi	xylosidasi	butirrato	leucina
	p/p%	nmol/ g TB*h										
Oi		481.87 <sup>a</sup> (82.02)	173.73 <sup>a</sup> (84.50)	17.02 <sup>a</sup> (7.32)	29.26 <sup>a</sup> (10.43)	97.21 <sup>a</sup> (54.41)	14.52 <sup>a</sup> (6.37)	130.31 <sup>a</sup> (21.58)	28.05 <sup>a</sup> (2.23)	15.72 <sup>a</sup> (5.97)	149.78 <sup>a</sup> (26.29)	2.97 <sup>a</sup> (2.28)
A	7.20 <sup>a</sup> (0.65)	82.92 <sup>b</sup> (17.41)	13.74 <sup>b</sup> (3.45)	1.27 <sup>b</sup> (0.10)	4.15 <sup>b</sup> (0.13)	4.92 <sup>b</sup> (1.49)	1.69 <sup>b</sup> (0.97)	23.02 <sup>b</sup> (1.37)	12.28 <sup>b</sup> (4.81)	1.72 <sup>b</sup> (0.76)	33.88 <sup>b</sup> (7.78)	0.20 <sup>a</sup> (0.06)
2CB	11.90 <sup>a</sup> (0.03)	25.25 <sup>b</sup> (8.43)	7.10 <sup>b</sup> (3.01)	1.02 <sup>b</sup> (0.14)	3.12 <sup>b</sup> (0.04)	2.32 <sup>b</sup> (1.63)	0.90 <sup>b</sup> (0.49)	4.27 <sup>b</sup> (1.92)	1.01 <sup>b</sup> (0.12)	0.32 <sup>b</sup> (0.04)	12.47 <sup>b</sup> (3.93)	0.58 <sup>a</sup> (0.41)
3Bh	9.16 <sup>a</sup> (2.97)	53.00 <sup>b</sup> (24.16)	17.00 <sup>b</sup> (1.43)	1.01 <sup>b</sup> (0.90)	4.18 <sup>b</sup> (0.22)	6.94 <sup>b</sup> (2.44)	3.99 <sup>b</sup> (3.01)	15.36 <sup>b</sup> (7.64)	3.09 <sup>b</sup> (0.64)	0.87 <sup>b</sup> (0.17)	20.58 <sup>b</sup> (10.18)	1.25 <sup>a</sup> (0.50)
4Cb	9.89 <sup>a</sup> (2.82)	54.33 <sup>b</sup> (9.73)	14.57 <sup>b</sup> (1.59)	1.27 <sup>b</sup> (0.25)	4.79 <sup>b</sup> (0.23)	4.18 <sup>b</sup> (0.63)	3.05 <sup>b</sup> (2.83)	12.60 <sup>b</sup> (5.41)	3.26 <sup>b</sup> (2.61)	1.28 <sup>b</sup> (1.10)	21.88 <sup>b</sup> (0.44)	0.60 <sup>a</sup> (0.32)

**Tabella 7** Analisi del vetro e delle potenzialità enzimatiche seconda area con vegetazione di 20/25 anni.

orizzonte	vetro	SEI	SEIc	cellulasi	chitinasi	b_glucosidasi	a_glucosidasi	fosfatasi	sulfatasi	xylosidasi	butirrato	leucina
	p/p%	nmol/ g TB*h										
Oi		275.52 <sup>a</sup> (63.24)	58.51 <sup>a</sup> (17.46)	9.74 <sup>a</sup> (0.00)	13.29 <sup>a</sup> (1.23)	23.67 <sup>a</sup> (15.15)	5.96 <sup>a</sup> (4.20)	115.34 <sup>a</sup> (22.94)	14.02 <sup>a</sup> (0.96)	5.84 <sup>a</sup> (0.65)	89.48 <sup>a</sup> (13.32)	1.70 <sup>a</sup> (1.50)
A	4.15 <sup>a</sup> (1.28)	77.39 <sup>b</sup> (7.19)	17.13 <sup>b</sup> (4.29)	1.76 <sup>b</sup> (0.31)	3.83 <sup>b</sup> (0.68)	8.59 <sup>a</sup> (3.53)	1.67 <sup>a</sup> (0.12)	18.08 <sup>b</sup> (3.59)	6.96 <sup>a</sup> (1.02)	1.29 <sup>b</sup> (0.11)	35.21 <sup>b</sup> (1.70)	0.19 <sup>a</sup> (0.14)
Cb	11.88 <sup>a</sup> (1.44)	27.01 <sup>b</sup> (16.93)	6.81 <sup>b</sup> (4.92)	0.80 <sup>b</sup> (0.81)	2.64 <sup>b</sup> (0.85)	2.10 <sup>a</sup> (1.89)	0.91 <sup>a</sup> (1.07)	5.27 <sup>b</sup> (3.66)	1.71 <sup>a</sup> (0.68)	0.36 <sup>b</sup> (0.31)	13.22 <sup>b</sup> (7.66)	0.20 <sup>a</sup> (0.04)
Bh	4.57 <sup>b</sup> (0.03)	72.69 <sup>b</sup> (17.88)	13.20 <sup>b</sup> (1.23)	1.65 <sup>b</sup> (0.18)	3.45 <sup>b</sup> (0.31)	4.74 <sup>a</sup> (0.15)	1.83 <sup>a</sup> (0.11)	16.20 <sup>b</sup> (1.68)	9.82 <sup>a</sup> (8.68)	1.53 <sup>b</sup> (0.85)	33.47 <sup>b</sup> (6.30)	0.34 <sup>a</sup> (0.13)

**Tabella 8** Analisi del vetro e delle potenzialità enzimatiche terza area con vegetazione di 30/35 anni.

orizzonte	vetro	SEI	SEIc	cellulasi	chitinasi	b_glucosidasi	a_glucosidasi	fosfatasi	sulfatasi	xylosidasi	butirrato	leucina
	p/p%	nmol/ g TB*h										
Oi		334.00 <sup>a</sup> (33.19)	70.59 <sup>a</sup> (8.31)	8.19 <sup>a</sup> (4.83)	13.91 <sup>a</sup> (1.66)	34.22 <sup>a</sup> (7.46)	7.38 <sup>a</sup> (2.90)	94.80 <sup>a</sup> (5.40)	18.83 <sup>a</sup> (0.30)	6.89 <sup>a</sup> (1.13)	149.77 <sup>a</sup> (30.58)	0.43 <sup>a</sup> (0.07)
A	9.62 <sup>a</sup> (4.64)	104.68 <sup>b</sup> (72.02)	20.78 <sup>ab</sup> (14.18)	1.94 <sup>a</sup> (1.82)	5.89 <sup>b</sup> (2.88)	8.24 <sup>b</sup> (6.32)	2.14 <sup>a</sup> (1.16)	23.68 <sup>b</sup> (15.70)	10.23 <sup>a</sup> (7.18)	2.56 <sup>a</sup> (2.01)	49.99 <sup>b</sup> (34.95)	0.06 <sup>b</sup> (0.04)
Bw	7.37 <sup>a</sup> (2.78)	55.58 <sup>b</sup> (37.98)	12.49 <sup>a</sup> (9.78)	1.61 <sup>a</sup> (2.05)	3.91 <sup>b</sup> (2.06)	4.01 <sup>b</sup> (3.55)	1.49 <sup>a</sup> (1.45)	7.83 <sup>b</sup> (2.63)	3.76 <sup>a</sup> (1.67)	1.47 <sup>a</sup> (0.67)	31.49 <sup>b</sup> (23.90)	0.09 <sup>b</sup> (0.07)
2Bh	8.26 <sup>a</sup> (1.87)	77.63 <sup>b</sup> (29.42)	12.26 <sup>ab</sup> (4.53)	34.23 <sup>a</sup> (1.11)	3.15 <sup>b</sup> (0.56)	3.24 <sup>b</sup> (0.44)	2.09 <sup>a</sup> (0.74)	14.51 <sup>b</sup> (2.36)	5.65 <sup>a</sup> (1.21)	2.48 <sup>a</sup> (168)	44.94 <sup>b</sup> (26.04)	0.20 <sup>b</sup> (0.12)

**Tabella 9-** Confronto fra le diverse aree: 1) età di forestazione 6/7 anni, 2) età di forestazione 20/25 anni, 3) età di forestazione 30/35 anni.

AREA	vetro p/p%	SEI	SEIc	cellulasi	chitinasi	b glucosidasi	a glucosidasi	fosfatasi	sulfatasi	xylosidasi	butirrato	leucina
						nmol/ g TB*h						
1	9.83 <sup>a</sup> (2.05)	102.56 <sup>a</sup> (23.23)	33.46 <sup>a</sup> (14.24)	3.10 <sup>a</sup> (1.47)	7.22 <sup>a</sup> (1.59)	16.25 <sup>a</sup> (7.38)	4.24 <sup>a</sup> (2.93)	27.04 <sup>a</sup> (5.55)	6.43 <sup>a</sup> (0.33)	2.77 <sup>a</sup> (0.70)	35.83 <sup>a</sup> (2.83)	1.04 <sup>a</sup> (0.55)
2	7.78 <sup>a</sup> (0.54)	75.69 <sup>a</sup> (9.19)	15.64 <sup>a</sup> (0.41)	2.12 <sup>a</sup> (0.32)	4.14 <sup>a</sup> (0.27)	6.02 <sup>a</sup> (0.64)	1.89 <sup>a</sup> (0.11)	22.00 <sup>a</sup> (2.47)	6.94 <sup>a</sup> (3.64)	1.48 <sup>a</sup> (0.25)	31.23 <sup>a</sup> (1.85)	0.42 <sup>ab</sup> (0.23)
3	7.55 <sup>a</sup> (0.05)	105.24 <sup>a</sup> (30.60)	19.90 <sup>a</sup> (5.95)	2.30 <sup>a</sup> (0.55)	4.80 <sup>a</sup> (1.05)	7.43 <sup>a</sup> (1.92)	2.57 <sup>a</sup> (1.09)	23.41 <sup>a</sup> (1.62)	7.20 <sup>a</sup> (1.42)	2.79 <sup>a</sup> (1.33)	54.74 <sup>a</sup> (24.85)	0.20 <sup>b</sup> (0.08)

#### 4.1.4 RISULTATI EL-FAME

Dall'analisi degli acidi grassi con metodo EL-FAME non sono emerse differenze statisticamente significative lungo il transetto come mostrato in Tabella 13 , tranne per il contenuto in PLFA attribuibili a microzoedafon presenti unicamente nella prima area a livello degli orizzonti organici e organo minerali.

Nella prima area del transetto con età di forestazione 6/7 anni dove prevale la vegetazione erbacea, prendendo in considerazione sia i gruppi di microrganismi sia la natura dei PLFA, si evidenziano differenze nell'orizzonte Oi e a volte nell'orizzonte A. In quest'area sono stati rilevati PLFA attribuibili ai microzoedaphon con un valore medio di 5.96 nmol/g.

Nella seconda area con età di forestazione tra i 20 e i 25 anni, ricoperta prevalentemente da vegetazione arbustiva, si osservano differenze tra l'orizzonte Oi e il resto del profilo in tutti i parametri analizzati come mostrato **Tabella 11**. Fa eccezione il contenuto in funghi saprofiti e batteri generali dove, anche l'orizzonte A mostra valori che si discostano dal resto del profilo. L'orizzonte Oi presenta valori medi di 4541.16 e 511.76 nmol/g di rispettivamente batteri generali e funghi saprofiti. L'orizzonte A invece ha valori medi di 831.59 e 117.62 nmol/g rispettivamente di batteri generali e funghi saprofiti che si discostano, oltre che dai valori medi dell'orizzonte Oi, anche ai valori medi dell'orizzonte Cb (315.16 e 30.84 nmol/g) e dai valori di Bh (245.38 e 10.02 nmol/g).

Nell'area con forestazione di 30/35 anni, ricoperta principalmente da vegetazione arborea, non vi sono differenze statisticamente significative lungo il profilo.

Anche se non vi sono variazioni statisticamente significative tra i diversi siti, lungo il transetto si può notare un incremento della biomassa batterica e della biomassa fungina. Nella prima area sono state rilevate 1495.13 nmol/g di biomassa batterica, aumentata a 1623.07 nmol/g nella seconda, fino ad una concentrazione di 1681.52 nmol/g di biomassa batterica rilevata nell'area con vegetazione di 30-35 anni. La biomassa batterica deve il suo aumento all'incremento della porzione di GN, passati da 398.30 nmol/g a 483.20 nmol/g, e dei batteri generali, che da 633.56 nmol/g raggiungono concentrazioni di 763.26 nmol/g, compensando ampiamente la leggera diminuzione dei GP (da 424.45 a 408.10 nmol/g).

**Tabella 10** analisi PLFA nell'area con forestazione di 6/7 anni.

orizzonte	bacterial general	G_P	G_N	Act	FungiT	Fungi	SF	AMF	Micr	Sat	mono	Iso	anteiso	Cy	Pre	Tot_bact	tot_biom
nmol/g																	
Oi	2986.01 <sup>a</sup> (177.81)	1737.66 <sup>a</sup> (114.31)	1868.51 <sup>a</sup> (54.42)	203.22 <sup>a</sup> (45.98)	1379.93 <sup>a</sup> (209.39)	428.10 <sup>a</sup> (12.73)	521.87 <sup>a</sup> (124.76)	429.96 <sup>a</sup> (71.89)	44.29 <sup>a</sup> (6.88)	2986.01 <sup>a</sup> (177.81)	2338.26 <sup>a</sup> (169.15)	1168.72 <sup>a</sup> (80.71)	568.94 <sup>a</sup> (33.60)	375.46 (28.05)	676.47 <sup>a</sup> (13.58)	6795.41 <sup>a</sup> (191.72)	8219.63 <sup>a</sup> (10.80)
A	830.22 <sup>b</sup> (2.70)	440.43 <sup>b</sup> (26.64)	643.48 <sup>b</sup> (26.85)	29.81 <sup>b</sup> (7.95)	468.65 <sup>b</sup> (0.14)	177.31 <sup>b</sup> (14.25)	111.72 <sup>b</sup> (8.53)	179.61 <sup>b</sup> (5.58)	7.20 <sup>b</sup> (10.18)	830.22 <sup>b</sup> (2.70)	851.12 <sup>b</sup> (25.01)	299.00 <sup>b</sup> (18.77)	141.43 <sup>b</sup> (7.86)	141.17 (7.45)	188.97 <sup>b</sup> (20.03)	1943.94 <sup>b</sup> (42.84)	2416.19 <sup>b</sup> (47.80)
2Cb	175.01 <sup>c</sup> (91.93)	158.29 <sup>c</sup> (74.37)	176.48 <sup>c</sup> (111.08)	0.00 <sup>b</sup> (0.00)	81.86 <sup>c</sup> (42.86)	36.25 <sup>c</sup> (15.08)	24.31 <sup>b</sup> (20.49)	21.30 <sup>c</sup> (7.29)	0.00 <sup>b</sup> (0.00)	175.01 <sup>c</sup> (91.93)	206.85 <sup>c</sup> (125.32)	106.36 <sup>c</sup> (50.03)	51.93 <sup>c</sup> (24.34)	25.49 (10.50)	60.30 <sup>c</sup> (42.46)	509.77 <sup>c</sup> (277.38)	591.63 <sup>c</sup> (320.24)
3Bh	329.63 <sup>c</sup> (84.62)	299.43 <sup>bc</sup> (78.14)	164.62 <sup>c</sup> (70.79)	32.06 <sup>b</sup> (22.12)	87.68 <sup>c</sup> (41.30)	34.82 <sup>c</sup> (12.53)	22.46 <sup>b</sup> (14.70)	30.41 <sup>c</sup> (14.07)	0.00 <sup>b</sup> (0.00)	329.63 <sup>c</sup> (84.62)	201.66 <sup>c</sup> (91.31)	189.35 <sup>bc</sup> (41.09)	110.08 <sup>bc</sup> (37.05)	28.18 (6.08)	67.74 <sup>c</sup> (23.07)	825.73 <sup>c</sup> (255.67)	913.41 <sup>c</sup> (296.97)
4Cb	248.34 <sup>c</sup> (59.86)	191.67 <sup>c</sup> (59.81)	121.46 <sup>c</sup> (61.27)	4.50 <sup>b</sup> (5.48)	47.80 <sup>c</sup> (13.48)	24.54 <sup>c</sup> (12.66)	11.59 <sup>b</sup> (6.29)	11.67 <sup>c</sup> (5.48)	0.00 <sup>b</sup> (0.00)	248.34 <sup>c</sup> (59.86)	129.33 <sup>c</sup> (55.13)	129.15 <sup>c</sup> (42.28)	62.52 <sup>c</sup> (17.53)	28.34 (13.33)	52.68 <sup>c</sup> (31.22)	565.96 <sup>c</sup> (175.47)	613.77 <sup>c</sup> (188.94)

**Tabella 11** risultati analisi PLFA nell'area con forestazione 20/25 anni.

orizzonte	bacterial_ general	G_P	G_N	Act	Fungi_T	Fungi	SF	AMF	micr	Sat	mono	Iso	anteiso	Cy	pre	tot_bact	tot_biom
nmol/g																	
Oi	4541.61 <sup>a</sup> (272.02)	2148.14 <sup>a</sup> (568.91)	2964.23 <sup>a</sup> (707.17)	128.31 <sup>a</sup> (38.2)	1662.08 <sup>a</sup> (255.55)	694.76 <sup>a</sup> (157.61)	511.76 <sup>a</sup> (29.11)	455.56 <sup>a</sup> (127.06)	0.00 (0.00)	4733.96 <sup>a</sup> (272.02)	3575.74 <sup>a</sup> (859.59)	1658.25 <sup>a</sup> (334.13)	892.17 <sup>a</sup> (234.77)	525.37 <sup>a</sup> (129.44)	909.41 <sup>a</sup> (242.37)	10376.92 <sup>a</sup> (1586.53)	12039.00 <sup>a</sup> (1842.07)
A	831.59 <sup>b</sup> (14.90)	407.85 <sup>b</sup> (78.75)	593.40 <sup>b</sup> (93.19)	36.88 <sup>b</sup> (2.21)	374.90 <sup>b</sup> (88.86)	132.36 <sup>b</sup> (27.46)	117.62 <sup>b</sup> (3.54)	124.92 <sup>b</sup> (57.86)	0.00 (0.00)	831.59 <sup>b</sup> (14.90)	721.56 <sup>b</sup> (160.58)	273.63 <sup>b</sup> (46.85)	134.22 <sup>b</sup> (31.90)	122.54 <sup>b</sup> (17.20)	180.23 <sup>b</sup> (30.57)	1869.73 <sup>b</sup> (189.05)	2244.63 <sup>b</sup> (277.91)

orizzonte	bacterial general	G_P	G_N	Act	Fungi_T	Fungi	SF	AMF	micr	Sat	mono	Iso	anteiso	Cy	Pre	tot_bact	tot_biom
Cb	315.16 <sup>c</sup>	267.98 <sup>b</sup>	231.26 <sup>b</sup>	8.53 <sup>b</sup>	120.15 <sup>b</sup>	49.57 <sup>b</sup>	30.84 <sup>c</sup>	39.73 <sup>b</sup>	0.00	315.16 <sup>c</sup>	283.23 <sup>b</sup>	170.64 <sup>b</sup>	97.33 <sup>b</sup>	37.34 <sup>b</sup>	95.43 <sup>b</sup>	822.93 <sup>b</sup>	943.08 <sup>b</sup>
	(105.71)	(84.23)	(117.72)	(10.75)	(59.14)	(23.50)	(20.21)	(15.43)	(0.00)	(105.71)	(131.46)	(52.49)	(31.74)	(25.20)	(44.14)	(318.41)	(377.54)
Bh	245.38 <sup>c</sup>	225.64 <sup>b</sup>	104.43 <sup>b</sup>	12.19 <sup>b</sup>	40.70 <sup>b</sup>	25.75 <sup>b</sup>	10.02 <sup>c</sup>	4.92 <sup>b</sup>	0.00	245.38 <sup>c</sup>	100.21 <sup>b</sup>	132.00 <sup>b</sup>	93.64 <sup>b</sup>	34.90 <sup>b</sup>	38.36 <sup>b</sup>	587.65 <sup>b</sup>	628.35 <sup>b</sup>
	(166.75)	(51.30)	(61.91)	(2.26)	(7.92)	(10.90)	(3.98)	(6.96)	(0.00)	(166.75)	(44.01)	(35.98)	(15.32)	(21.84)	(27.39)	(282.22)	(290.14)

**Tabella 12** risultati analisi PLFA nell'area con forestazione di 30/35 anni.

orizzonte	bacterial general	G_P	G_N	Act	Fungi_T	Fungi	SF	AMF	micr	Sat	mono	Iso	anteiso	Cy	Pre	tot_bact	tot_biom
nmol/g																	
Oi	3828.49 <sup>a</sup>	1692.97 <sup>a</sup>	2007.93 <sup>a</sup>	130.16 <sup>a</sup>	1337.02 <sup>a</sup>	456.71 <sup>a</sup>	549.80 <sup>a</sup>	330.52 <sup>a</sup>	0.00 <sup>a</sup>	3828.49 <sup>a</sup>	2453.54 <sup>a</sup>	1084.44 <sup>a</sup>	608.53 <sup>a</sup>	322.68 <sup>a</sup>	441.08 <sup>a</sup>	7659.56 <sup>a</sup>	8996.58 <sup>a</sup>
	(2808.78)	(1037.39)	(1368.62)	(91.03)	(1057.44)	(321.97)	(436.77)	(298.70)	(0.00)	(2808.78)	(1810.12)	(681.74)	(355.65)	(176.59)	(302.24)	(5305.82)	(6363.26)
A	871.27 <sup>a</sup>	534.03 <sup>a</sup>	676.75 <sup>a</sup>	47.48 <sup>a</sup>	481.79 <sup>a</sup>	198.31 <sup>a</sup>	190.67 <sup>a</sup>	92.81 <sup>a</sup>	0.00 <sup>a</sup>	871.27 <sup>a</sup>	744.95 <sup>a</sup>	340.12 <sup>a</sup>	193.90 <sup>a</sup>	168.55 <sup>a</sup>	201.20 <sup>a</sup>	2129.53 <sup>a</sup>	261132 <sup>a</sup>
	(689.49)	(385.40)	(445.85)	(39.89)	(427.84)	(180.95)	(185.75)	(61.14)	(0.00)	(689.49)	(473.91)	(246.35)	(139.06)	(142.49)	(134.86)	(1560.63)	(1988,46)
Bw	279.52 <sup>a</sup>	194.54 <sup>a</sup>	308.89 <sup>a</sup>	8.00 <sup>a</sup>	146.75 <sup>a</sup>	43.04 <sup>a</sup>	70.25 <sup>a</sup>	33.45 <sup>a</sup>	0.00 <sup>a</sup>	279.52 <sup>a</sup>	353.84 <sup>a</sup>	123.01 <sup>a</sup>	71.53 <sup>a</sup>	31.55 <sup>a</sup>	82.57 <sup>a</sup>	790.95 <sup>a</sup>	937,70 <sup>a</sup>
	(35.51)	(1.26)	(37.84)	(2.08)	(7.53)	(3.44)	(15.96)	(4.99)	(0.00)	(35.51)	(29.73)	(1.13)	(0.13)	(0.33)	(0.06)	(72.53)	(80,07)
2Bh	201.00 <sup>a</sup>	164.96 <sup>a</sup>	151.03 <sup>a</sup>	5.74 <sup>a</sup>	54.89 <sup>a</sup>	18.98 <sup>a</sup>	24.79 <sup>a</sup>	11.12 <sup>a</sup>	0.00 <sup>a</sup>	201.00 <sup>a</sup>	154.35 <sup>a</sup>	111.42 <sup>a</sup>	53.54 <sup>a</sup>	26.77 <sup>a</sup>	35.13 <sup>a</sup>	522.72 <sup>a</sup>	577.61 <sup>a</sup>
	(11.83)	(30.82)	(41.71)	(8.11)	(25.09)	(8.30)	(21.73)	(4.93)	(0.00)	(11.83)	(43.91)	(25.90)	(4.92)	(1.17)	(5.17)	(52.59)	(77.69)



**Tabella 13** Confronto dei PLFA fra le diverse aree: 1) età di forestazione 6/7 anni, 2) età di forestazione 20/25 anni, 3) età di forestazione 30/35 anni.

Orizzonte	bacterial general	G_P	G_N	Act	Fungi_T	Fungi	SF	AMF	micr	Sat	mono	Iso	anteiso	Cy	Pre	tot_bact	tot_biom
nmol/g																	
1	633.56 <sup>a</sup> (69.97)	424.45 <sup>a</sup> (60.46)	398.30 <sup>a</sup> (80.64)	38.82 <sup>a</sup> (14.67)	262.42 <sup>a</sup> (61.40)	90.72 <sup>a</sup> (15.89)	87.97 <sup>a</sup> (29.91)	83.72 <sup>a</sup> (15.60)	5.96 <sup>a</sup> (1.18)	633.56 <sup>a</sup> (69.97)	492.15 <sup>a</sup> (105.41)	281.74 <sup>a</sup> (36.66)	142.71 <sup>a</sup> (23.80)	78.05 <sup>a</sup> (7.53)	144.84 <sup>a</sup> (27.56)	1495.13 <sup>a</sup> (225.73)	1763.19 <sup>a</sup> (286.40)
2	737.63 <sup>a</sup> (24.85)	442.75 <sup>a</sup> (33.39)	421.52 <sup>a</sup> (45.52)	21.16 <sup>a</sup> (0.39)	240.09 <sup>a</sup> (6.66)	97.76 <sup>a</sup> (10.02)	78.29 <sup>a</sup> (11.41)	64.04 <sup>a</sup> (8.05)	0.00 <sup>a</sup> (0.00)	737.63 <sup>a</sup> (24.85)	500.57 <sup>a</sup> (51.62)	283.46 <sup>a</sup> (20.29)	159.29 <sup>a</sup> (13.10)	81.11 <sup>a</sup> (11.55)	139.56 <sup>a</sup> (17.13)	1623.07 <sup>a</sup> (104.16)	1863.16 <sup>a</sup> (110.82)
3	763.26 <sup>a</sup> (286.93)	408.10 <sup>a</sup> (74.99)	483.20 <sup>a</sup> (88.29)	26.97 <sup>a</sup> (12.10)	287.53 <sup>a</sup> (70.48)	99.85 <sup>a</sup> (16.74)	121.31 <sup>a</sup> (19.18)	66.37 <sup>a</sup> (34.56)	0.00 <sup>a</sup> (0.00)	763.26 <sup>a</sup> (286.93)	560.36 <sup>a</sup> (141.30)	263.77 <sup>a</sup> (47.44)	144.33 <sup>a</sup> (27.55)	80.78 <sup>a</sup> (5.85)	115.84 <sup>a</sup> (18.36)	1681.52 <sup>a</sup> (462.32)	1969.06 <sup>a</sup> (532.80)

## 4.1 DISCUSSIONE RISULTATI

### 4.1.1 ANALISI MORFOLOGICA

Nei profili 2 BIS, 3 e 3 BIS è individuato un orizzonte Cf, che indica strato ghiacciato. Data la zona il Cf è verosimilmente del permafrost, pertanto si è scelto di classificare il suolo nell'ordine dei Gelysols data la sua presenza. Spesso il permafrost può essere confuso con ghiaccio stagionale o una lente di ghiaccio che nell'anno del campionamento è sopravvissuta al caldo estivo. L'aspetto richiederebbe ulteriori analisi che permetterebbero di confermare la reale presenza di permafrost. Nel caso in cui si fosse in presenza di ghiaccio stagionale, il suolo non potrebbe essere classificato come Glacic Haplorthels, ma rientrerebbe nell'ordine degli Inceptisols e sarebbe classificato come Vitrandic Humicryept, sandy, mixed, frigid.

Sono stati inoltre individuati degli orizzonti sombric (Bh), che spesso in campo vengono confusi con degli Ab, ovvero A sepolti. L'orizzonte sombric è un orizzonte sotto superficiale formatosi sotto drenaggio libero. Esso contiene humus in forma illuviale, non deve essere associato da alluminio e nemmeno disperso da sodio (ambiente vicino al mare che forma una soluzione che non permette la sedimentazione), conseguentemente non può avere una alta capacità di scambio cationico e l'argilla non può avere un'elevata saturazione basica. Si forma in ambienti freddi umidi, plateau montani e submontani, tropicali e subtropicali. (Schafer & White, 1982)

L'orizzonte sombric ha un colore con basso value e croma, più basso di quello sopra. Nel caso della presenza di orizzonte Bh sotto superficiale si presenta scuro, uno scuro tendente al rosso per via dell'alta presenza di acidi fulvici.

L'orizzonte è stato classificato come Bh poiché esso ha un colore più scuro rispetto agli orizzonti superficiali, ha una esigua presenza di radici, non c'è un'elevata presenza di Al, non c'è presenza di sodio. Dalle analisi del suolo troviamo un contenuto elevato di sostanza organica nell'orizzonte organico, che si abbassa per poi risalire improvvisamente. Questa sostanza organica spesso è accompagnata anche da un contenuto di argille, principalmente costituite da minerali amorfi.

Pertanto, l'orizzonte sombric esso è stato identificato grazie a numerosi parametri, tra cui la presenza di un elevato contenuto organico, presenza di argille e del permafrost sottostante.

L'orizzonte sombric spesso viene confuso con un Ab, ovvero un orizzonte A (organo minerale) sepolto, cioè una vecchia superficie sepolta da nuovo materiale. Considerando le condizioni islandesi questo potrebbe essersi verificato poiché, il territorio è caratterizzato da frequenti

eruzioni vulcaniche oltre che da erosione, trasporto e sedimentazione di materiale eolico. Inoltre, nelle vicinanze del sito si trova un fiume proglaciale che più volte ha esondato e ricoperto la superficie con del sedimento glacio-fluviale.

Per la genesi degli orizzonti Bh è necessario che non ci sia né presenza di Al né di minerali argillosi amorfi come allofane e imogoliti, ci deve essere un suolo vulcanico che sia poco sviluppato e uno strato impermeabile sotto l'orizzonte in questione.

La genesi del Bh avviene per via della traslocazione di materiale organico, che deve essere stato finemente sminuzzato, per poter acquisire una leggera solubilità che gli permetta di essere preso in carico dall'acqua che si infiltra e lo trasporta negli strati più profondi; Una volta che la sostanza organica viene presa in carico dall'acqua essa deve raggiungere gli orizzonti più profondi finché non si incontra un orizzonte dove la porosità diminuisce causando la perdita dell'energia cinetica e la sedimentazione del materiale. Dopo che si siano verificate le prime sedimentazioni il punto suddetto si intaserà sempre più per occlusione dei pori, dando vita all'orizzonte sombric (Bh).

Per fare ciò il substrato deve essere molto poroso e grossolano, il che fa sì che l'acqua mantenga una sufficiente energia cinetica tale da permettere la solubilizzazione della sostanza organica, nello specifico sostanze non umiche e acidi fulvici. Inoltre, non deve essere presente dell'argilla negli strati superficiali in quanto questa adsorbirebbe la sostanza organica impedendogli di essere traslocata negli orizzonti più profondi.

Non vi deve essere neanche la presenza di Al in quanto esso si andrebbe a complessare con la sostanza organica rendendoli insolubili. Per ottenere una deposizione, una volta incontrato l'orizzonte meno poroso, è necessario che non ci sia presenza di sodio (Na). Il sodio, infatti, forma dei sali veri con la sostanza organica che si scioglierebbero in una soluzione perfetta, il che non permetterebbe poi la precipitazione una volta incontrato l'orizzonte meno poroso, ma in quel caso la sostanza organica verrebbe dilavata dal suolo.

È importante che ci sia anche dell'intensa attività microbica a livello dell'orizzonte organico poiché ci deve essere una frammentazione molto intensa della sostanza organica, al punto da fargli raggiungere un peso molecolare tale da poter essere presa in carico dall'acqua e migrare. Gli acidi fulvici infatti sono poco solubili, ma se vengono finemente sminuzzati divengono leggermente solubili.

La particolarità di questo processo è che a seguito della frantumazione degli acidi fulvici, essi perdono il loro potere colorante. Una volta sedimentati però grazie alla presenza di argille e di Al

si riaggregano a formare gruppi con peso molecolare più elevato costituendo anche dei gruppi cromatografi.

Una sedimentazione delle sostanze non umiche e degli acidi fulvici, derivanti dagli orizzonti soprastanti è favorita dalla formazione di argille nell'orizzonte in questione per far sì che, una volta che la sostanza organica è traslocata venga adsorbita dall'argilla e resa altamente insolubile.

Nel sito preso in esame questi criteri sono soddisfatti, inoltre vi è la presenza di permafrost che essendo impermeabile favorisce la sedimentazione del materiale traslocato.

La presenza di una vecchia superficie, quindi di un orizzonte Ab, a causa dell'assenza di una struttura ben formata. Per averne la certezza si dovrebbe studiare il rapporto tra acidi umici e acidi fulvici. In presenza di un Bh gli acidi fulvici sono ampiamente superiori (o quasi la totalità) rispetto agli acidi umici.

Per far sì che avvenga la genesi di un'orizzonte Bh è necessario che ci sia traslocazione (strato semisolubile), non una lisciviazione che indica la formazione di una soluzione perfetta, né un processo di leaching che indica una sospensione.

Tutto il processo è favorito dalla presenza del freddo, poiché esso induce prevalentemente la di prevalentemente acidi fulvici e una minima parte di acidi umici, più pesanti e che quindi non riuscirebbero a diventare "semisolubili".

#### 4.1.2 VETRO

I suoli islandesi sono formati da materiale piroclastico e materiale eolico con consistente contenuto in vetro, tipico quindi del sedimento loess identificato tramite l'analisi morfologica. Quando le condizioni ambientali divengono favorevoli la vegetazione riesce ad insediarsi nel substrato, che grazie alla sua suscettibilità, viene velocemente alterato, portando alla formazione di minerali secondari (O. Arnalds, 2004; Mankasingh & Gísladóttir, 2019) Il vetro vulcanico, o ossidiana, risulta essere il più alterabile dei minerali grazie alla sua natura non cristallina. Infatti, esso viene definito un minerale SROM (Short-Range Order Minerals), cioè caratterizzato da assenza di un reticolo cristallino, ma con limitate porzioni al suo interno disposte in maniera ordinata, rendendolo quindi un minerale "parzialmente amorfo", poiché se sottoposto a diffrattometria a raggi X<sup>3</sup> si individuerebbero dei momenti in cui il minerale riflette la radiazione incidente. Dall'alterazione del vetro, formato da silicio e alluminio, si ottiene una frazione colloidale ricca in allophane e ferridrite, fondamentali per la fertilità del suolo. Questi minerali secondari, formatosi per co-precipitazione di silicio e alluminio, stabilizzano la sostanza organica tramite la formazione di complessi alluminio e ferro umici, permettendo di stoccare grandi quantità di Corg (Mankasingh & Gísladóttir, 2019).

Data quindi l'importanza del vetro nella formazione degli Andisols e data la sua suscettibilità all'alterazione, lo si è andato a studiare principalmente per verificare l'intensità di materiale eolico nel sito di interesse, e per evidenziare eventuali segni di alterazione, indice di uno sviluppo in atto del suolo (O. Arnalds & Kimble, 2001).

I risultati riportano un quantitativo di vetro al di sotto dell'atteso. Infatti, la concentrazione maggiore è stata registrata negli orizzonti Cb delle prime 2 aree (rispettivamente di 11.90 nella prima area e 11.88 nella seconda), che discosta dai valori tipici dei suoli islandesi che variano dal 50 all'80% (O. Arnalds & Kimble, 2001).

Dall'analisi del vetro inoltre è emerso che il progetto di riforestazione non ha ancora causato effetti tangibili e misurabili sul suolo, in quanto non vi sono state trovate differenze significative di contenuto di vetro lungo il transetto.

---

<sup>3</sup> Un diffrattometro è un apparecchio con un tubo generatore di raggi X monocromatici che vengono fatti impattare sulla superficie di un campione dal quale si ricavano informazioni sulla sua capacità di diffrazione/riflessione dei raggi X. Se il reticolo è cristallino allora avviene una diffrazione, si vedono dei picchi sul diffrattogramma.

#### 4.1.1 ATTIVITÀ ENZIMATICA

Dall'analisi dell'attività enzimatica emerge che nella prima zona vi è un maggior dinamismo, che diminuisce muovendosi lungo il transetto fino ad arrivare alla terza area, dove c'è una maggiore stabilità che si riflette sull'omogeneità degli orizzonti.

Come atteso, l'attività enzimatica è concentrata negli strati più superficiali, dove c'è un maggior apporto di materiale organico, decomposto dai microrganismi per ricavarne del nutrimento (Moscatelli et al., 2018). Concentrando l'attenzione sull'orizzonte Oi, infatti è emerso che l'area forestata 6/7 anni fa, con un SEI di 28.05 nmol/ g\*TB\*h contro le 14.02 e 18.83 nmol/g\*TB\*h della seconda e terza area, è più dinamica. Il SEI risulta essere un indicatore delle capacità enzimatiche dei microrganismi del suo.

Confrontando l'orizzonte organico lungo il transetto è emersa anche una variazione statisticamente significativa dell'arylsulfatasi (EC 3.1.6.1), di cui si registrano 28.05 nmol/g\*TB\*h nella prima area, 14.02 nmol/g\*TB\*h nella seconda area, e 18.83 nmol/g\*TB\*h nella terza area. L'arylsulfatasi è l'enzima che catalizza l'idrolisi degli organo-solfati. Esso è considerato in parte responsabile del ciclo dello zolfo, partecipando alla mineralizzazione di Sorg in  $(SO_4)^-$ , utile all'assorbimento vegetale. L'alto contenuto di arylsulfatasi quindi può rivelare un'elevata attività enzimatica a carico dello zolfo, che verosimilmente arriva al suolo come idrogeno solfato derivato dall'attività vulcanica tipica del territorio islandese. L'idrogeno solfato  $H_2S$ , a contatto con la superficie del suolo, viene facilmente ossidato in  $(SO_4)^-$ , che è prontamente immesso nel ciclo dei nutrienti del suolo grazie all'attività dei microrganismi. Questo non avviene nell'area 3 con forestazione di 30/35 anni poiché la vegetazione è prevalentemente arborea. Questo fa sì che l'idrogeno solfato entri in contatto per lo più con la chioma della vegetazione, non arrivando al suolo. Una volta sulla superficie della foglia, l'idrogeno solfato viene assorbito dalla pianta principalmente attraverso gli stomi, che lo sottrae dal ciclo sopra descritto. (Ausma & de Kok, 2019).

Il maggiore dinamismo della prima area, rispetto alla terza area del transetto, può essere ascrivibile a una presenza/ assenza di una copertura nevosa coibente.

Nella prima area, data la mancanza di una copertura arborea densa ad impedire la formazione di uno strato nevoso sufficientemente omogeneo e spesso per espletare la funzione di coibentazione,

il suolo non raggiunge mai temperature al disotto dei  $-3/-5^{\circ}\text{C}$  permettendo ai microrganismi di non interrompere il proprio metabolismo durante il periodo invernale. (Brooks et al., 1997)

Situazione differente si ha nell'area 3, caratterizzata da copertura prevalentemente arborea, che impedisce la formazione dello strato nevoso coibente (Pomeroy et al., 2002), esponendo il suolo, quindi i microrganismi, a un congelamento della superficie del suolo, costringendo i microrganismi ad arrestare il proprio metabolismo per la mancanza di acqua libera nel sistema suolo.

#### 4.1.2 EL-FAME

L'analisi degli acidi grassi dei fosfolipidi ha permesso di rilevare la presenza di microzoofauna (protozoi) unicamente nell'area dominata da vegetazione erbacea (età di forestazione 6/7 anni).

La presenza dei protozoi è limitata alla prima area in quanto, grazie alla formazione di uno strato coibente di neve che non permette al suolo di arrivare a temperature molto inferiori allo 0°C, riescono a sopravvivere anche durante il periodo invernale. (Brooks et al., 1997)

I protozoi, infatti, costruiscono le loro popolazioni rapidamente durante i periodi in cui le condizioni ambientali sono favorevoli. Quando le condizioni divengono sfavorevoli, formano delle cisti, ovvero entrano in stato di quiescenza. La maggior parte delle cisti non sopravvive alla stagione avversa dove le temperature scendono ampiamente al di sotto dello 0°C. Questo avviene in quelle aree dove non si forma copertura nevosa, ovvero nella seconda area e terza area per la presenza di vegetazione arbustiva e arborea (Schostag et al., 2019).

Quando il suolo si scongela le cisti vengono aggredite e degradate dai batteri, ostacolando ancor più la ricostruzione della popolazione. Questo processo ripetuto anno dopo anno, porta alla scomparsa di questi microrganismi in quelle aree dove non si forma una copertura nevosa continua e sufficientemente spessa per poter fornire l'effetto coibente. (Pomeroy et al., 2002).

L'omogeneità statistica lungo la terza area del transetto vegetazionale, coperta da vegetazione arborea e identificata come più statica, può essere spiegata grazie a 2 fenomeni complementari.

Il primo riguarda l'espansione diretta dei microrganismi che accrescendosi vanno a conquistare sempre più nuovi spazi in cerca di porzioni di nicchia non ancora occupate, arrivando alla situazione che vediamo nell'area 3 del transetto vegetazionale, dove i microrganismi a seguito di un'espansione sono verosimilmente arrivati a colonizzare tutta la colonna di suolo, occupandone al meglio tutte le porzioni.

In questo processo di colonizzazione e migrazione lungo la colonna di suolo sono aiutati dal fenomeno di "flushing", tipico degli ambienti artici. In questi ambienti, grazie alle basse temperature invernali, assenza di uno strato nevoso sufficientemente spesso da permettere una coibentazione termica del suolo, si verifica un congelamento della superficie del suolo.



Nei primi mesi primaverili, quando le temperature iniziano a salire, il suolo si riscalda portando a fusione del ghiaccio più superficiale, il quale inizialmente rimane in superficie. Con l'abbassamento del livello del ghiaccio, che funge da strato impermeabile, scende anche la colonna d'acqua risultante dallo scongelamento. Più si va verso il pieno della stagione primaverile, più le temperature salgono, più l'acqua nel suolo dal suo stato solido passa allo stato liquido, abbassando sempre più il livello del ghiaccio e conseguentemente della colonna d'acqua. (Pautler et al., 2010)

Con la discesa del livello dell'acqua, viene trasportato tutto il materiale accumulato in soluzione e sospensione, tra cui sostanza organica e verosimilmente anche i microrganismi, finché non diminuisce l'energia cinetica, provocando la precipitazione di questo materiale che viene distribuito lungo tutta la colonna di suolo. Questo processo fa sì che si faciliti una distribuzione dei microrganismi lungo tutto il profilo, andando verso una omogeneizzazione della diversità microbica.

Questo processo non può avvenire nella prima area del transetto poiché lì, essendoci la prevalenza di vegetazione erbacea, si forma una copertura nevosa tale da impedire il congelamento del suolo sottostante. Inoltre, lo scongelamento della neve è molto più lento rispetto allo scongelamento del ghiaccio superficiale, il che porta ad avere una massa d'acqua che si infiltra con una velocità piuttosto esigua, che si riflette poi in un'energia cinetica del liquido insufficiente a creare una sospensione di acqua materiale organico, argille e microrganismi.

## 5 CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto lo scopo di approfondire l'analisi del processo pedogenetico in suoli di ambiente proglaciale dell'Islanda, prendendo in considerazione il contenuto in vetro e l'aspetto microbiologico. L'analisi è stata eseguita attraverso un transetto vegetazionale in aree sottoposte a riforestazione in tre differenti periodi temporali: la prima avvenuta 6/7 anni fa, la seconda circa 20 e la terza 30/35.

L'analisi microbiologica è stata affrontata sia a livello di potenzialità enzimatica degli enzimi idrolitici extracellulari, sia a livello di comunità microbica attraverso lo studio degli acidi grassi dei fosfolipidi contenuti nelle membrane cellulari con metodo EL-FAME.

Dai risultati non emerge un'alterazione significativa del substrato, anche se si possono osservare i primi segni dell'alterazione, stando ad indicare che il processo evolutivo del suolo si trova ancora nelle fasi iniziali, nonostante l'alta suscettibilità del substrato. Questo è verosimilmente dovuto alle rigide condizioni ambientali che rendono il processo molto più lento rispetto ad altre aree. Dall'analisi microbiologica si è potuto osservare un trend che sembrerebbe essere sinonimo di evoluzione delle comunità microbiche lungo il transetto vegetazionale. Nella prima area i microrganismi sono risultati essere molto più dinamici e confinati negli orizzonti superficiali del suolo, caratterizzati da un'elevata presenza di sostanza organica. Nella terza area i microrganismi hanno colonizzato il suolo fino agli orizzonti più profondi, il che è riconducibile ad una stabilizzazione delle popolazioni microbiche, confermata anche dall'aumento del totale della biomassa batterica e fungina. La copertura forestale ha favorito la traslocazione delle comunità microbiche negli orizzonti più profondi, impedendo la formazione di una copertura nevosa tale da permettere l'isolamento termico degli strati più superficiali del suolo. Nei mesi primaverili, il rapido scioglimento del ghiaccio negli strati superficiali del suolo, potrebbe portare al fenomeno del "flushing", con la conseguente traslocazione di microrganismi.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- Amorosi, T., Buckland, P., Dugmore, A., Ingimundarson, J. H., & McGovern, T. H. (1997). Raiding the Landscape: Human Impact in the Scandinavian North Atlantic. *Human Ecology*, 25(3), 491–518. <https://doi.org/10.1023/A:1021879727837>
- Arnalds, A. (1987). Ecosystem disturbance in Iceland. *Arctic & Alpine Research*, 19(4), 508–513. <https://doi.org/10.2307/1551417>
- Arnalds, O. (2004). Volcanic soils of Iceland. *Catena*, 56(1–3), 3–20. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.10.002>
- Arnalds, O. (2008). Soils of Iceland. *Jökull*, 58(April), 409–421. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9621-7>
- Arnalds, O., Dagsson-Waldhauserova, P., & Olafsson, H. (2016). The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts - A review. *Aeolian Research*, 20, 176–195. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.01.004>
- Arnalds, O., Gisladottir, F. O., & Sigurjonsson, H. (2001). Sandy deserts of Iceland: An overview. *Journal of Arid Environments*, 47(3), 359–371. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0680>
- Arnalds, O., & Kimble, J. (2001). Andisols of Deserts in Iceland. *Soil Science Society of America Journal*, 65(6), 1778–1786. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.1778>
- Ausma, T., & de Kok, L. J. (2019). Atmospheric H<sub>2</sub>S: Impact on plant functioning. *Frontiers in Plant Science*, 10(June). <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00743>
- Bjornsson, H. (1992). Jokulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation. *Annals of Glaciology*, 16, 95–106. <https://doi.org/10.3189/1992aog16-1-95-106>
- Björnsson, H., & Pálsson, F. (2008). Icelandic glaciers. *Jökull*, 58(58), 365–386.
- Bonatotzky, T., Ottner, F., Erlendsson, E., & Gísladóttir, G. (2019). The weathering of volcanic tephra and how they impact histosol development. An example from South East Iceland. *Catena*, 172(January 2018), 634–646. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.022>
- Box, G.E.P. and Cox, D.R. (1964), An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 26: 211-243. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>
- Brooks, P. D., Schmidt, S. K., & Williams, M. W. (1997). Winter production of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from alpine tundra: Environmental controls and relationship to inter-system C and N fluxes. *Oecologia*, 110(3), 403–413. <https://doi.org/10.1007/PL00008814>
- Brindley, G.W., Brown, G., 1980. Crystal Structures of Clay Minerals and their Identification. Mineralogical Society Monograph No. 5. Mineralogical Society, London.
- Crofts, R. (2011). Healing the Land. In *Science* (Issue 72).

- Dugmore, A. J., Gísladóttir, G., Simpson, I. A., & Newton, A. (2009). Conceptual Models of 1200 Years of Icelandic Soil Erosion Reconstructed Using Tephrochronology. *Journal of the North Atlantic*, 2, 1–18. <https://doi.org/10.3721/037.002.0103>
- Einarsson. (1984). *Einarsson 1984 climate of Iceland.pdf*.
- Frostegård, Å., Tunlid, A., & Bååth, E. (2011). Use and misuse of PLFA measurements in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(8), 1621–1625. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.021>
- Guan, H., Fan, J., Zhang, H., & Harris, W. (2021). Comparison of drivers of soil microbial communities developed in karst ecosystems with shallow and deep soil depths. *Agronomy*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/agronomy11010173>
- Gudmundsson, T., Björnsson, H., & Thorvaldsson, G. (2005). Elemental composition, fractions and balance of nutrients in an Andic Gleysol under a long-term fertilizer experiment in Iceland HÓLMGEIR BJÖRNSSON 2 nutrients in an Andic Gleysol under a long-term. *Icelandic Agricultural Sciences*, 18, 21–32.
- Hanna, E., Jónsson, T., & Box, J. E. (2004). An analysis of Icelandic climate since the nineteenth century. *International Journal of Climatology*, 24(10), 1193–1210. <https://doi.org/10.1002/joc.1051>
- Kaštovská, K., Stibal, M., Šabacká, M., Černá, B., Šantrůčková, H., & Elster, J. (2007). Microbial community structure and ecology of subglacial sediments in two polythermal Svalbard glaciers characterized by epifluorescence microscopy and PLFA. *Polar Biology*, 30(3), 277–287. <https://doi.org/10.1007/s00300-006-0181-y>
- Larsen, G. (2000). Holocene eruptions within the Katla volcanic system, south Iceland: Characteristics and environmental impact. *Jökull*, 49(49), 1–28.
- Larsen, G., Newton, A. J., Dugmore, A. J., & Vilmundardóttir, E. G. (2001). Geochemistry, dispersal, volumes and chronology of Holocene silicic tephra layers from the Katla volcanic system, Iceland. *Journal of Quaternary Science*, 16(2), 119–132. <https://doi.org/10.1002/jqs.587>
- Mankasingh, U., & Gísladóttir, G. (2019). Early indicators of soil formation in the Icelandic sub-arctic highlands. *Geoderma*, 337(December 2017), 152–163. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.002>
- Marx, M. C., Wood, M., & Jarvis, S. C. (2001). A microplate fluorimetric assay for the study of enzyme diversity in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(12–13), 1633–1640. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00079-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00079-7)
- Moscattelli, M. C., Secondi, L., Marabottini, R., Papp, R., Stazi, S. R., Mania, E., & Marinari, S. (2018). Assessment of soil microbial functional diversity: land use and soil properties affect CLPP-MicroResp and enzymes responses. *Pedobiologia*, 66(July 2017), 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2018.01.001>
- Nannipieri, P., Giagnoni, L., Renella, G., Puglisi, E., Ceccanti, B., Masciandaro, G., Fornasier, F., Moscatelli, M. C., & Marinari, S. (2012). Soil enzymology: Classical and molecular

approaches. *Biology and Fertility of Soils*, 48(7), 743–762. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0723-0>

- Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In *Methods of Soil Analysis* (Eds) D. Sparks, A. Page, P. Helmke, R. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabataba, C.T. Johnston and M.E. Summer. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>
- Ólafsson, H., Furger, M., & Brümmer, B. (2007). The weather and climate of Iceland. *Meteorologische Zeitschrift*, 16(1), 5–8. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2007/0185>
- Óskarsson, H., Arnalds, Ó., Gudmundsson, J., & Gudbergsson, G. (2004). Organic carbon in Icelandic Andosols: Geographical variation and impact of erosion. *Catena*, 56(1–3), 225–238. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2003.10.013>
- Pautler, B. G., Simpson, A. J., McNally, D. J., Lamoureux, S. F., & Simpson, M. J. (2010). Arctic permafrost active layer detachments stimulate microbial activity and degradation of soil organic matter. *Environmental Science and Technology*, 44(11), 4076–4082. <https://doi.org/10.1021/es903685j>
- Pomeroy, J. W., Gray, D. M., Hedstrom, N. R., & Janowicz, J. R. (2002). Prediction of seasonal snow accumulation in cold climate forests. *Hydrological Processes*, 16(18), 3543–3558. <https://doi.org/10.1002/hyp.1228>
- R core team (2013). R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing, Vienna, Austria. ISBN3-900051-07-0.<http://www.R-project.org/>.
- Russell, A. J., Roberts, M. J., Fay, H., Marren, P. M., Cassidy, N. J., Tweed, F. S., & Harris, T. (2006). Icelandic jökulhlaup impacts: Implications for ice-sheet hydrology, sediment transfer and geomorphology. *Geomorphology*, 75(1-2 SPEC. ISS.), 33–64. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.05.018>
- Schafer, J., & White, K. L. (1982). Soil Taxonomy. *Journal of Agronomic Education*, 11(1), 3–3. <https://doi.org/10.2134/jae.1982.0003>
- Schostag, M., Priemé, A., Jacquiod, S., Russel, J., Ekelund, F., & Jacobsen, C. S. (2019). Bacterial and protozoan dynamics upon thawing and freezing of an active layer permafrost soil. *ISME Journal*, 13(5), 1345–1359. <https://doi.org/10.1038/s41396-019-0351-x>
- Schutter, M. E., & Dick, R. P. (2000). Comparison of Fatty Acid Methyl Ester (FAME) Methods for Characterizing Microbial Communities. *Soil Science Society of America Journal*, 64(5), 1659–1668. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451659x>
- Streeter, R., Dugmore, A. J., & Vésteinsson, O. (2012). Plague and landscape resilience in premodern Iceland. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(10), 3664–3669. <https://doi.org/10.1073/pnas.1113937109>
- Thordarson, T., & Hoskulddson, A. (2008). Postglacial volcanism in Iceland. *Jokull*, 58(58), 197–228.
- Thorsteinsson, I., Olafsson, G., & Dyne, G. M. van. (1971). Range Resources of Iceland. *Journal of Range Management*, 24(2), 86. <https://doi.org/10.2307/3896512>

- Vepsäläinen, M., Kukkonen, S., Vestberg, M., Sirviö, H., & Maarit Niemi, R. (2001). Application of soil enzyme activity test kit in a field experiment. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(12–13), 1665–1672. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00087-6)
- Willers, C., Jansen van Rensburg, P. J., & Claassens, S. (2015). Phospholipid fatty acid profiling of microbial communities-a review of interpretations and recent applications. *Journal of Applied Microbiology*, 119(5), 1207–1218. <https://doi.org/10.1111/jam.12902>
- Zori, D. M. (2016). The Norse in Iceland. In *Oxford Handbooks Online* (Vol. 1, Issue May 2016). <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199935413.013.7>

## 7 INDICE DELLE FIGURE E TABELLE

### 7.1 FIGURE

<b>Figura 1</b> Temperature e precipitazioni medie mensili nel periodo 1961–1990 a Reykjavík (Southwest-Iceland) e Akureyri (North-Iceland). (Ólafsson et al., 2007) .....	1
<b>Figura 2</b> Mappa zone neovulcaniche e sistemi vulcanici attivi, Islanda (Crofts, 2011) .....	2
<b>Figura 3</b> Laghi subglaciali nelle aree geotermiche, siti di eruzioni vulcaniche subglaciali, e fiumi colpiti da jokulhlaups, Islanda (Bjornsson, 1992).....	4
<b>Figura 4</b> Localizzazione di laghi di ghiaccio arginati e fiumi colpiti da jokulhlaups provenienti da questi laghi durante il XX secolo. (Bjornsson, 1992) .....	5
<b>Figura 5</b> Deserti sabbiosi in Islanda, mostrati con i colori giallo e rosso, in base al grado di severità dell'erosione (giallo; erosione di severità 4, erosione grave; rosso: erosione di severità 5, erosione estremamente grave). Molti hot-spot sono marcati con un bollino verde (O. Arnalds et al., 2016) .....	6
<b>Figura 6</b> Esempi di deserti sabbiosi più estesi in Islanda. A) Livello di suolo attuale mettendo in risalto la deflazione annuale (circa 30 cm); B) sedimento preso in carico da un flusso glaciale, scomparso nel giro di poche ore; C) superficie sabbiosa di origine vulcanica. ....	6
<b>Figura 7</b> Copertura vegetale nel periodo dell'insediamento nel nono secolo e nel ventesimo secolo. Fonte: IINH (Crofts & Olgeirsson, 2011).....	8
<b>Figura 8</b> Temperature annuali medie attraverso 4 periodi di tempo. (Crofts, 2011) .....	9
<b>Figura 9</b> Semplificazione della mappa dei suoli islandese, basata su Arnalds and Gretarsson (2001) Molti dei Vitrisols sono stati classificati come Andosols coerentemente con la WRB e Andisols in linea con la Soil Taxonomy. (O. Arnalds, 2004).....	10
<b>Figura 10</b> Separazione di Andisols e Histosols islandesi, basati su drenaggio (asse X) e input eolici (asse Y).....	12
<b>Figura 11</b> Deserto islandese, Sandy lag gravel surface. La copertura vegetale non supera l'1/2% (Arnalds & Kimble, 2001). ....	12
<b>Figura 12</b> Sviluppo di un tipico Andosols in Islanda che si forma con materiale tefra ed eolico. Adattato da Arnalds et al. (1995) e Kimble et al. (2000). Il suolo si è formato nei pressi di Goðafoss in North Iceland. (O. Arnalds, 2008) .....	16
<b>Figura 13</b> Relazione tra i tipi di suoli (asse delle X) e pH, contenuto in carbonio e contenuto di argille. Lungo l'asse delle X, da sinistra a destra abbiamo: Histosols(H), Histic Andosols (HA),	

Gleyic Andosols (GA), Brown Andosols (BA) e Vitrisols(V). Il contenuto di sostanza organica è usato per discriminare le varie classi (O. Arnalds, 2008). .....	17
<b>Figura 14</b> Hummocks in Islanda. (O. Arnalds, 2008).....	17
<b>Figura 15</b> Roche Moutonnée Un poggio roccioso con un pendio leggermente inclinato e liscio verso l'alto a causa dell'abrasione glaciale e un ripido e accidentato pendio verso il basso a causa della spiumatura glaciale. Fonte: www.swisseduc.ch.....	26
<b>Figura 16</b> contenuto in sabbia, limo e argilla nelle tre aree del transetto .....	29
<b>Figura 17</b> triangolo della tessitura per evidenziare le classi dei suoli nel transetto. ....	30
<b>Figura 18</b> Variazioni di pH e TOC lungo il profilo 1 e 1 BIS .....	32
<b>Figura 19</b> Variazioni di pH e TOC lungo il profilo 2 e 2 BIS .....	33
<b>Figura 20</b> Variazioni di pH e TOC lungo il profilo 3 e 3 BIS .....	33
<b>Figura 21</b> Rappresentazione grafica delle differenze statistiche lungo il transetto vegetazionale. ....	34
<b>Figura 22</b> Foto dei 6 profili. Profilo 1/1bis: età di forestazione 6/7 anni. Profilo 2/2 bis: età di forestazione 20 anni. Profilo 3/3 bis età di forestazione di 30/35 anni. ....	40
<b>Figura 23</b> confronto tra il contenuto in vetro dei 3 transetti .....	45
<b>Figura 24</b> A) confronto dell'arilsulfati tra gli orizzonti Oi lungo il transetto; B) confronto del SEI (Synthetic Enzimatic Index) tra gli orizzonti Oi lungo il transetto.....	47

## 7.2 TABELLE

<b>Tabella 1</b> Superfici attualmente colpite dall'erosione eolica in Islanda. La voce 'Erosion severity' rappresenta l'attività erosiva: 3: considerable; 4: severe; 5: extremely severe. Basata su "Soil Erosion in Iceland" (O. Arnalds et al., 2001) .....	6
<b>Tabella 2</b> Tipi di suolo, principali criteri diagnostici e classificazione in accordo con la Soil taxonomy (S.T) <sup>2</sup> e la WRB <sup>3</sup> . Estensione per ciascuna classe espressa in accordo con la mappa 1:25.000 (Figura 9) (O. Arnalds, 2008). ....	11
<b>Tabella 3</b> Biomarker utilizzati in questo studio per identificare i principali gruppi di microrganismi .....	22
<b>Tabella 4</b> – Distribuzione delle particelle su base granulometrica di un transetto vegetazionale a Hveragerdi, sud dell'Islanda. ....	28
<b>Tabella 5</b> – Risultato delle analisi chimiche lungo un transetto vegetazionale a Hveragerdi, Sud dell'Islanda.....	31



<b>Tabella 6</b> Analisi del vetro e delle potenzialità enzimatiche prima area con vegetazione di 6/7 anni.....	48
<b>Tabella 7</b> Analisi del vetro e delle potenzialità enzimatiche seconda area con vegetazione di 20/25 anni.....	49
<b>Tabella 8</b> Analisi del vetro e delle potenzialità enzimatiche terza area con vegetazione di 30/35 anni.....	49
<b>Tabella 9-</b> Confronto fra le diverse aree: 1) età di forestazione 6/7 anni, 2) età di forestazione 20/25 anni, 3) età di forestazione 30/35 anni. ....	50
<b>Tabella 10</b> analisi PLFA nell'area con forestazione di 6/7 anni. ....	52
<b>Tabella 11</b> risultati analisi PLFA nell'area con forestazione 20/25 anni. ....	52
<b>Tabella 12</b> risultati analisi PLFA nell'area con forestazione di 30/35 anni. ....	53
<b>Tabella 13</b> Confronto dei PLFA fra le diverse aree: 1) età di forestazione 6/7 anni, 2) età di forestazione 20/25 anni, 3) età di forestazione 30/35 anni. ....	54