

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

CAMPUS DI RAVENNA

SCUOLA DI SCIENZE
LAUREA MAGISTRALE IN
ANALISI E GESTIONE DELL'AMBIENTE

**TORBIERE DI MONTAGNA:
MAPPATURA E STATO DELLE TORBIERE
DEL TRENTINO-ALTO ADIGE**

TESI DI LAUREA IN MONITORAGGIO E PIANIFICAZIONE DEL TERRITORIO

Relatore:
Prof.ssa Sonia Silvestri

Presentata da:
Alessandra Borgia

Correlatore:
Dott.ssa Mariapina Castelli

Matricola: 801029

Anno Accademico: 2019-2020

ABSTRACT

Le torbiere, nonostante rappresentino importanti riserve di carbonio organico, svolgendo quindi un ruolo essenziale nella mitigazione al cambiamento climatico, sono considerate tra gli habitat maggiormente a rischio, la cui tutela risulta fondamentale.

Il presente elaborato, attraverso l'identificazione delle principali torbiere presenti in parte del territorio regionale del Trentino-Alto Adige, si pone due obiettivi: (i) lo sviluppo e l'analisi di una metodologia per la mappatura delle torbiere alpine e (ii) la stima, attraverso l'esaminazione di campioni prelevati nella zona dell'Alta Val Rendena, della quantità di carbonio organico da esse immagazzinato.

Tramite l'uso del software QGIS sono state mappate 71 torbiere, la cui presenza sul territorio è stata certificata dalla consultazione di diverse fonti di dati. Queste torbiere sono state utilizzate come classe di "verità a terra", che, in aggiunta ad altre classi, ovvero acqua, suolo, prato, roccia, seminativo 1-2-3-4, urbano, bosco e neve, hanno permesso di effettuare, attraverso il software SNAP, una classificazione *Random Forest*, applicata ad alcune immagini satellitari Sentinel-2. La seconda attività, svoltasi a Madonna di Campiglio, ha previsto il campionamento della torba presente in quattro torbiere.

I risultati mostrano che la classificazione *Random Forest* causa una sovrastima delle aree di torba, specialmente nelle zone coperte da seminativo, prato e bosco.

Dai risultati delle analisi svolte in laboratorio si evince che la densità apparente secca ha valori maggiori a profondità di campionamento comprese tra 50 e 100 cm. Il contenuto di carbonio organico immagazzinato per volume di suolo, invece, presenta valori medi meno variabili. Le quantità di carbonio organico più elevate si trovano all'interno dei campioni prelevati a profondità comprese tra i 50 e 180 cm.

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE	1
1.1 TORBIERE ALPINE	5
1.2 BIOMASSA DELLE TORBIERE	6
1.3 TELERILEVAMENTO	8
1.3.1 SPETTRO ELETTROMAGNETICO	11
1.3.2 INFLUENZA DELL'ATMOSFERA	12
1.3.3 SATELLITI	15
1.3.4 VISUALIZZAZIONE DELL'IMMAGINE	17
2. SCOPO DELLA RICERCA	19
2.1 MAPPATURA DELLE TORBIERE ALPINE	19
2.2 STIMA DEL CARBONIO ORGANICO STOCCATO	20
3. MATERIALI e METODI DELLA RICERCA	21
3.1 AREA DI STUDIO	21
3.1.1 AREA DI CAMPIONAMENTO	22
3.2 RACCOLTA DATI	24
3.2.1 BANCHE DATI	24
3.2.2 SOFTWARE: QGIS e SNAP	24
3.2.3 DIGITALIZZAZIONE DELLE TORBIERE	25
3.2.4 MODELLO DIGITALE DEL TERRENO (DTM)	25
3.2.5 CREAZIONE DELLE MASCHERE	27
3.2.6: IMMAGINI SATELLITARI: SENTINEL 2	30
3.3 ANALISI DEI DATI	33
3.3.1 CORREZIONE GEOMETRICA	33
3.3.2 CORREZIONE ATMOSFERICA	34
3.3.3 ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI DIGITALI	35
3.3.4 CLASSIFICAZIONE RANDOM FOREST	39
3.4 VALIDAZIONE DEL METODO TRAMITE MATRICE DI ERRORE	44
3.5 ANALISI IN LABORATORIO	46
3.5.1 DESCRIZIONE DEI SITI	46
3.5.2 CAMPIONAMENTO	49
3.5.3 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI	51
4. RISULTATI	56
4.1 DATABASE DELLE TORBIERE	56
4.2 DTM, PENDENZE E STATISTICA DELLE TORBIERE	56
4.3 APPLICAZIONE DELLA MASCHERA ALLE IMMAGINI SENTINEL-2	60

4.4 SELEZIONE RITAGLIO IMMAGINE SATELLITARE _____	61
4.5 CLASSIFICAZIONE SULLE IMMAGINI CON 10, 11 E 12 BANDE _____	67
4.5.1 CLASSIFICAZIONE SU IMMAGINE SENTINEL-2 _____	72
4.6 VALIDAZIONE DEL METODO _____	74
4.7 RISULTATI DELLE ANALISI DI LABORATORIO _____	78
4.7.1 DENSITÀ APPARENTE SECCA _____	78
4.7.2 CONTENUTO DI CARBONIO ORGANICO PER VOLUME DI SUOLO _____	80
5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI _____	83
5.1 DATABASE DELLE TORBIERE _____	83
5.2 QUOTE E MASCHERE DI PENDENZA _____	84
5.3 CLASSIFICAZIONE RANDOM FOREST _____	85
5.3.1 PROPOSTE DI AVANZAMENTO DELLO STUDIO _____	88
5.4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI DELLE ANALISI DI LABORATORIO _____	91
6. CONCLUSIONI _____	94
RINGRAZIAMENTI _____	96
BIBLIOGRAFIA _____	98
SITOGRAFIA _____	103
ALLEGATO I _____	1

INDICE DELLE ABBREVIAZIONI

UNITÀ di MISURA (Sistema Internazionale)

Grandezza di base	Nome	Simbolo
Lunghezza	Metro	m
Lunghezza	Millimetro (1×10^{-3} m)	mm
Lunghezza	Micrometro (1×10^{-6} m)	μm
Lunghezza	Nanometro (1×10^{-9} m)	nm
Superficie	Metro quadrato	m^2
Superficie	Chilometro quadrato (1×10^6 m^2)	km^2
Superficie	Ettaro (1×10^4 m^2)	ha
Potenza	Watt ($\text{kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-3}$)	W
Massa	Tonnellata (1×10^3 kg)	t
Massa	Chilotonnellata (1×10^6 kg)	kt
Massa	Petagrammo (1×10^{12} kg)	Pg

1. INTRODUZIONE

Le torbiere sono ambienti umidi presenti in aree caratterizzate da eccesso di acqua e dove, a causa delle particolari condizioni climatiche, idriche ed edafiche, la sostanza organica prodotta dai vegetali non si decompone, ma tende ad accumularsi, dando origine a un deposito organico definito torba (Bracco *et al.*, 2004). Tenzialmente, la formazione dello strato di torba è dovuta a condizioni di saturazione idrica e anaerobiosi, che impediscono la decomposizione bio-chimica della sostanza organica. Tale processo è legato a diversi fattori, come l'attività dei microrganismi, il trasporto controllato di accettori di elettroni e nutrienti e la qualità della materia organica stessa (Limpens *et al.*, 2008).

Il termine torbiera viene spesso utilizzato in sovrapposizione a quello di aree umide e paludi. La convenzione Ramsar fornisce una definizione piuttosto generale di aree umide, descrivendole come tutte le aree di palude, pantano, torbiera, distese di acqua, naturali e artificiali, permanenti o temporanee, con acqua ferma o corrente, dolce, salata o salmastra (definizione da D.P.R. 448/76) [10]. Per palude, invece, si intende un ambiente con terreno umido dominato da piante viventi che formeranno la torba (Rydin & Jeglum, 2006). Sia torbiera che palude sono quindi concetti più ristretti rispetto al termine di zona umida; infatti, non tutte le zone umide presentano le caratteristiche necessarie alla formazione dello strato di torba (Barthelmes *et al.*, 2015) (Fig. 1.1).

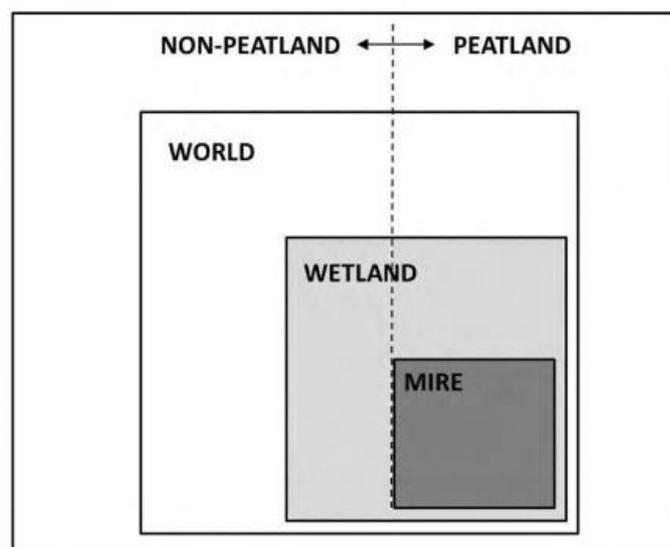


Figura 1.1: relazione tra torbiera (peatland), zona umida (wetland) e palude (mire) (Barthelmes *et al.*, 2015).

Le torbiere sono state definite come un argomento di priorità nell'ambito degli accordi internazionali e globali (Bonn *et al.*, 2014). Ne sono un esempio la Convenzione sulla Diversità Biologica (CBD), adottata in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e il suo Protocollo di Nagoya (ABS), la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) e il suo Protocollo di Kyoto e la Convenzione di Ramsar sulle zone umide.

Esse forniscono importanti servizi ecosistemici, tra cui la regolazione del clima attraverso il sequestro e stoccaggio del carbonio, fornitura di archivi paleoambientali e opportunità ricreative, regolazione dell'acqua e forniscono habitat per la fauna selvatica, di importanza nazionale e internazionale (Bonn *et al.*, 2014).

La quantità di sostanza organica contenuta nei suoli tipici è di circa il 5% (Uddin *et al.*, 2019); tuttavia, nei suoli che formano le torbiere, può raggiungere valori di oltre il 95% in volume e un contenuto del 40-50% di carbonio organico. Si stima inoltre che le torbiere, pur coprendo solo il 3% della superficie terrestre contengano circa il 30% del carbonio totale (Limpens *et al.*, 2008; Boaga *et al.*, 2020) immagazzinato all'interno dei suoli mondiali, vale a dire quasi la stessa quantità di quello che viene stoccato dalla vegetazione, comprendente sia la fitomassa ipogea che epigea (circa 500 - 600 Pg C) (Limpens *et al.*, 2008; Silvestri *et al.*, 2019a; 2019b; Boaga *et al.*, 2020).

Le condizioni chimico-fisiche delle torbiere rendono questi ambienti oggetto di molti studi, specie per la mitigazione del cambiamento climatico. I terreni torbosi sono di fatto importanti serbatoi di carbonio e se vengono degradati, per azione di processi erosivi, incendi, drenaggio o aratura, portano al rilascio di enormi volumi di anidride carbonica (CO₂), con conseguente aumento dell'effetto serra e una grave subsidenza del terreno (Boaga *et al.*, 2020).

Differenze nella chimica e nella composizione del materiale vegetale possono influenzare la formazione dello strato di torba. Ad esempio, le variazioni di pH che determinano la diversità vegetale all'interno delle torbiere naturali, dipendono principalmente dall'accumulo di torba, che provoca una diminuzione del contenuto di nutrienti e agisce sull'influenza dei cationi derivanti dal suolo minerale (Rydin & Jeglum, 2006).

La materia organica ha un'elevata capacità di scambio cationico (CEC) e tende ad adsorbire i cationi in cambio di ioni idrogeno. Per tale motivo la maggior parte delle sostanze chimiche, in particolare i cationi, sono adsorbiti sulle particelle di torba e solo una frazione minore è libera in soluzione (Rydin & Jeglum, 2006). Tuttavia, l'aspetto principale nella definizione delle torbiere è la presenza della tavola d'acqua, che permette di distinguerne, in forma generale, due tipi principali. Le prime sono definite basse o soligene, il cui deposito torboso, legato alla presenza di acqua freatica, risulta essere appiattito, mentre le seconde sono le torbiere alte o ombrogene. In queste ultime il deposito torboso è convesso e, sviluppandosi al di sopra del livello dell'acqua freatica, il loro apporto idrico deriva esclusivamente dalle acque di precipitazione (Bracco *et al.*, 2004).

Tra questi due estremi esistono stati di transizione che dipendono dal rapporto tra l'influenza della falda freatica e l'apporto idrico delle precipitazioni; per tale motivo si riconosce l'esistenza di un terzo tipo di torbiera, detta di transizione o a mosaico (Bracco *et al.*, 2004).

Secondo la descrizione più dettagliata, disponibile sul sito della Provincia Autonoma di Trento, nella sezione "Habitat Natura 2000" [16] le torbiere presenti sul territorio regionale si possono suddividere in quattro tipi:

- **TORBIERE BOSCOSE:** in cui l'habitat si presenta come prioritario. Comprende foreste di conifere (più raramente di latifoglie) sviluppate su suoli torbosi, sempre umidi o impaludati, poveri di nutrienti. Lo strato erbaceo è del tutto simile a quello delle torbiere alte o di transizione, con tappeti di sfagni e altre briofite.
- **TORBIERE ALTE ATTIVE:** habitat prioritario, di eccezionale e riconosciuta importanza naturalistica per il territorio alpino. Esso include le torbiere acide, ombrotrofiche, povere di minerali, alimentate principalmente dalle piogge, in cui il livello dell'acqua si mantiene generalmente più alto rispetto alla falda freatica circostante. La vegetazione, formata da piante perenni, è dominata da cuscinetti colorati di sfagni che consentono la crescita della torbiera. Si osserva spesso l'alternarsi di cumuli e di depressioni con acqua che affiora in superficie. Possono essere considerate un'espressione di un paesaggio postglaciale, giovanile. In fasi più evolute possono comparire piante di pino silvestre, pino mugo o betulla sopra i cumuli. Il termine "attive" indica aree in cui si sta formando della torba, comprese situazioni temporaneamente ferme per eventi di siccità prolungata o incendi.

- **TORBIERE DI TRANSIZIONE E INSTABILI:** habitat che include una nutrita serie di comunità vegetali che si sviluppano in condizioni da oligo- a mesotrofiche, in stazioni con caratteristiche intermedie tra quelle soligene ed ombrotrofiche. I siti sono spesso localizzati in posizione di transizione tra specchi d'acqua e terra ferma. Fisionomicamente si osservano cariceti (erbe ondegianti), tappeti galleggianti di briofite, con sfagni di diverse specie. Dato il livello della falda, possono essere presenti comunità di piante acquatiche o anfibiae, di elofite. Pur non essendo considerato prioritario, si tratta di un habitat di assoluta rilevanza ecologica e fitogeografica. A livello floristico, in particolare, la loro varietà è superiore a quella delle torbiere alte.
- **TORBIERE BASSE ALCALINE:** habitat relativamente diffuso nella fascia montana e subalpina ma, spesso, frammentario e molto articolato, con altri tipi di ambienti umidi ad esso associati. Le torbiere basse alcaline sono edificate da piccole carici e ospitano numerose specie, sia vascolari che briofitiche. I suoli, ricchi di basi, sono minerotrofici, ad elevata conducibilità, con pH da alcalino a subacido (contatti con torbiere di transizione e con i molinieti nelle aree pianeggianti).

Indipendentemente dal tipo, gli elementi chiave della formazione di una torbiera sono la presenza di muschi e sfagni, la temperatura ridotta e acqua in abbondanza, la quale impedisce il contatto della materia organica morta con l'atmosfera ossigenata, impedendone la decomposizione.

Definiti gli elementi chiave, i processi principali che concorrono alla formazione di una torbiera sono l'interrimento e l'impaludimento (Bracco *et al.*, 2004).

Al primo processo corrisponde una progressiva colonizzazione da parte della vegetazione; al secondo, invece, la colonizzazione di aree prima asciutte e in seguito inondate.

La successione delle fasi di interrimento di un ambiente acquatico si possono riassumere nel modo seguente (Bracco *et al.*, 2004):

- fango lacustre (fase acquatica);
- fango torboso (fase lemmitica);
- torba di cannuccia di palude (*Phragmites australis*) e di ciperacee (fase di formazione della torba);
- vegetazione arbustiva e forestale a ontano nero (*Alnus glutinosa*) (fase anfibia);
- foreste a betulle (*Betula*) e pini (*Pinus*) (fase terrestre);

- torba a giuncastrello delle torbiere (*Scheuchzeria palustris*), carici (*Carex*) e sfagni (fase telmatica);
- torba di sfagni (fase semi-terrestre).

A queste fasi è associato uno sviluppo della vegetazione differente, a seconda del livello dell'acqua.

A livello globale, le torbiere naturali sono un ambiente molto vulnerabile. A causa dei cambiamenti climatici e dell'azione diretta da parte dell'uomo, vengono distrutte ad un ritmo di 4.000 km² all'anno (di cui il 50% a causa dell'agricoltura). Questi tassi di perdite si verificano in gran parte nelle zone temperate e tropicali (Parish *et al.*, 2008).

1.1 TORBIERE ALPINE

La distribuzione delle torbiere è concentrata in specifiche regioni climatiche che permettono la formazione della torba. Il clima determina la quantità di acqua disponibile, mentre la temperatura influisce sulla produzione e degradazione del materiale organico (Parish *et al.*, 2008).

Le torbiere sono quindi abbondanti nelle zone con clima freddo e umido e in Italia sono distribuite prevalentemente sulle Alpi e sull'Appennino settentrionale (Bracco *et al.*, 2004) (Fig. 1.2). Tra le regioni italiane, il Trentino Alto-Adige è quella più ricca di questi ambienti (Bracco *et al.*, 2004).

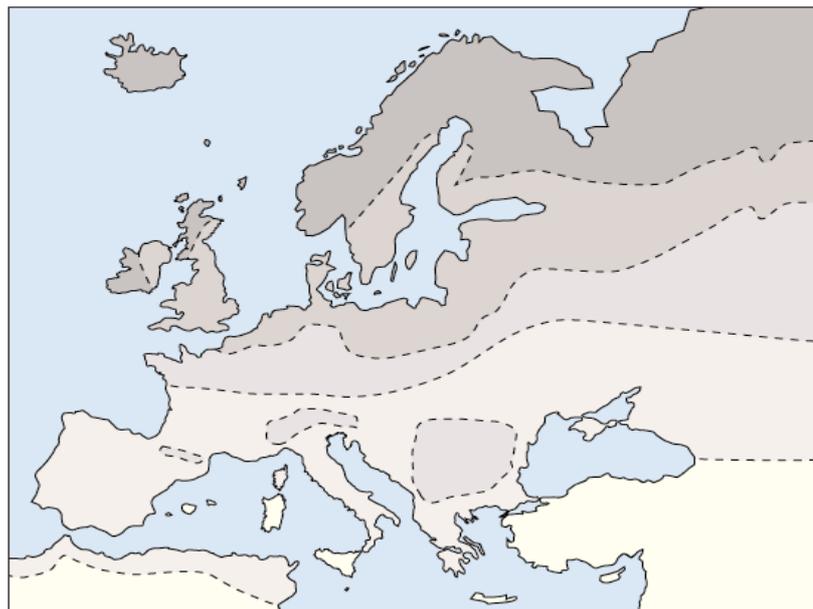


Figura 1.2: distribuzione delle torbiere in Europa: le aree più scure sono quelle ove la presenza è maggiore (Bracco *et al.*, 2004).

Negli ultimi anni le torbiere alpine sono state oggetto di attenzione e tutela da parte del Piano di Azione per il Cambiamento Climatico nelle Alpi, nell'ambito della Convenzione delle Alpi (Stati Membri della Convenzione delle Alpi, 2009), sia perché sono particolarmente vulnerabili ai cambiamenti climatici e sia perché, come conseguenza a questi, possono diventare sorgenti emmissive.

Le torbiere soligene sono le più comuni e si presentano come praterie a erba bassa. Il loro sviluppo è determinato principalmente dalla presenza della falda freatica molto superficiale e dal processo di interrimento dei corpi d'acqua, cui segue un accumulo progressivo di rizomi e radici di specie erbacee che portano alla formazione della torbiera (Bracco *et al.*, 2004). Talvolta possono evolversi in torbiere alte o di transizione, in tempi stimati di migliaia di anni [17].

In Italia le torbiere ombrogene, più rare, sono presenti principalmente nelle zone ad elevata piovosità, come sul piano montano e sul piano subalpino del versante meridionale delle Alpi. Sono tipicamente formate da sfagni (genere *Sphagnum*), organismi vegetali appartenenti alle briofite che costituiscono la massa di materiale organico che, in profondità, è soggetta a trasformazione in torba (Bracco *et al.*, 2004).

1.2 BIOMASSA DELLE TORBIERE

Le torbiere, come accennato, immagazzinano grandi quantità di carbonio organico, poiché la torba consiste essenzialmente in materiale vegetale che, non andando incontro a completa decomposizione, si accumula per migliaia di anni (Ballhorn *et al.*, 2011). La copertura vegetale che cresce al di sopra della torba rappresenta la fonte principale di questo materiale.

Nonostante l'ambiente talvolta ostile, le zone umide e quindi le torbiere, rappresentano un'importante fonte di biodiversità; tra le forme di vita presenti, vi sono soprattutto funghi e altri microrganismi, licheni, alghe, piante e animali (Rydin & Jeglum, 2006; 2013).

La disponibilità dei nutrienti, le caratteristiche fisiche delle torbiere, il chimismo delle acque, le condizioni di esposizione al Sole, e, a grande scala, il clima, sono tutti fattori che influenzano il tipo e il numero di organismi vegetali e animali che possono adattarsi a questo tipo di habitat (Bragazza & Gerdol, 1996).

I fattori ambientali che coprono un ruolo fondamentale sono essenzialmente due, la disponibilità di nutrienti e la presenza di acqua. Quest'ultima, pur essendo essenziale per la sopravvivenza di ogni organismo, se presente in eccesso può limitarne e talvolta

impedire la crescita. Diversi studi dimostrano infatti come la distribuzione della flora nelle zone torbose sia influenzata soprattutto dall'altezza della tavola d'acqua (Bragazza & Gerdol, 1996). Il pH, seppur limitando lo sviluppo di colonie batteriche e influenzando la distribuzione dei nutrienti, (Bragazza & Gerdol, 1996), che di norma nelle torbiere sono piuttosto scarsi (Rydin & Jeglum, 2006; 2013), rappresenta un fattore meno impattante.

Le torbiere, a seconda dell'altezza della tavola d'acqua, del gradiente di pH e della distribuzione dei nutrienti, si dividono principalmente in: alte o ombrogene; basse o minerogene; limnogene (Fig. 1.3). Queste ultime, formatesi dall'interrimento di un bacino lacustre, presentano condizioni mesotrofiche o eutrofiche, con relativa abbondanza di nutrienti e regimi di pH meno acidi, ma si estendono con meno abbondanza rispetto alle prime.

Le torbiere basse, o soligene (dal latino "sōli" del suolo e dal greco "génésis" nascere), sono caratterizzate da organismi più esigenti dal punto di vista nutritivo [7]. Sono ambienti meno estremi rispetto alle torbiere alte (descritte di seguito) perché, essendo alimentate da acque provenienti dal suolo minerale, posseggono una maggiore quantità di nutrienti disponibili e il loro pH risulta essere compreso in un intervallo di valori maggiore rispetto a quelle alte. Per tale motivo, spesso, le torbiere basse vengono definite anche minerotrofe (Rydin & Jeglum, 2006, 2013).

Tra le piante vascolari, più sensibili all'abbondanza dell'acqua e presenti in questi ambienti, vi sono specie della famiglia delle *Cyperaceae* e *Graminaceae*, mentre, tra le briofite si trovano per la maggioranza muschi bruni [7].

Le torbiere alte, o ombrogene (dal greco "ómbros", pioggia e "génésis", nascere), alimentate da acqua di precipitazione, vengono definite ombrotrofiche. Sono habitat che presentano una quantità di soluti più limitata rispetto alle precedenti perché l'acqua, non filtrando dal suolo, non si arricchisce di minerali. Sono torbiere che si sviluppano al di sopra della tavola d'acqua e sono caratterizzate principalmente da specie vegetali fortemente igrofile, del genere *Sphagnum*. Queste briofite sono adattate perfettamente ad ambienti freddi, acidi, con abbondanza di acqua e poveri di nutrienti. Esse assorbono le sostanze nutritive dalle acque, aumentandone così l'acidità e impedendo l'ingresso di altre specie vegetali [7]; (Rydin & Jeglum, 2006, 2013).

La copertura di queste briofite è estremamente importante per la formazione della torba, perché rappresentano le specie vegetali maggiormente presenti. L'accrescere di cumuli di sfagni nelle torbiere basse porta a un'evoluzione di queste in torbiere alte. La

letteratura evidenzia tale importanza assumendo che ci può essere più carbonio nello *Sphagnum* che in qualsiasi altro genere di piante nel mondo (Rydin & Jeglum, 2006).

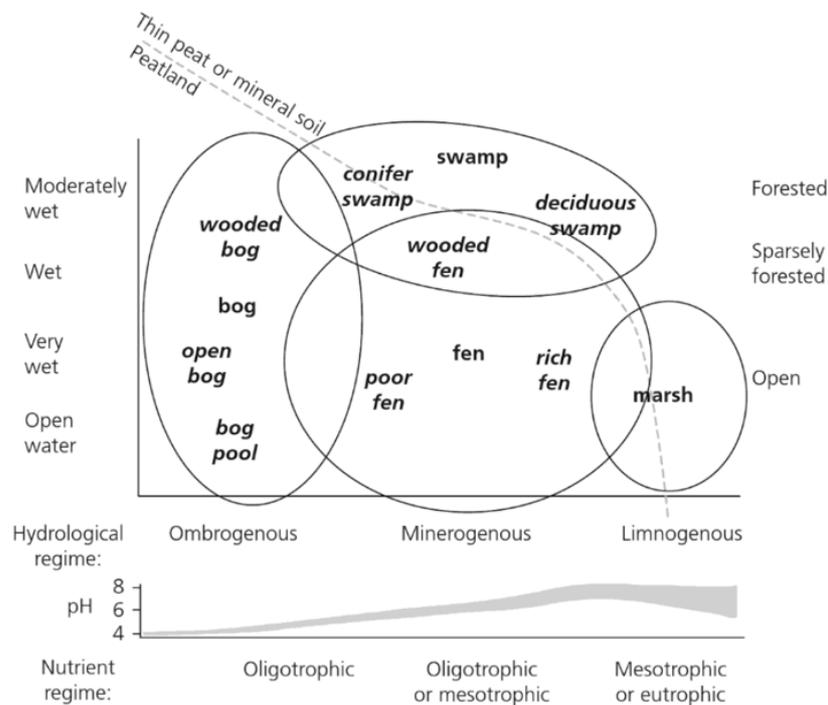


Figura 1.3: distribuzione dei tipi di zone umide a seconda dell'umidità, o altezza della tavola d'acqua (asse verticale) e il gradiente di pH e la distribuzione dei nutrienti (asse orizzontale) (Rydin & Jeglum, 2013).

1.3 TELERILEVAMENTO

Il telerilevamento (Fig. 1.4) viene definito dal Canada Centre of Remote Sensing (CCRS, 2019) come la scienza di acquisire informazioni sulla superficie terrestre, senza essere effettivamente in contatto con essa. Può essere quindi considerato come l'insieme di tutte le misure che vengono effettuate senza un contatto diretto con l'oggetto di interesse.

Viene anche definito come la scienza che opera, utilizzando come mezzo di interazione le radiazioni elettromagnetiche, lo studio della superficie terrestre e della stima delle proprietà geo-biofisiche (Reddy *et al.*, 2018; Schiavon & Pirotti, 2019).

Presenta diversi vantaggi rispetto ai tradizionali studi sul campo, in particolare il costo, la scala e la possibilità di visualizzazione di località remote (Lees *et al.*, 2018).

Le principali applicazioni di questa tecnologia riguardano soprattutto la valutazione e il monitoraggio ambientale, esplorazione di risorse non rinnovabili e rinnovabili, meteorologia, mappatura, sorveglianza e ricognizione militare (Schowengerdt, 2007). Negli studi che riguardano le torbiere, viene spesso utilizzato per il loro riconoscimento

e mappatura, per la stima della loro dinamica (Burdun *et al*, 2020) e per il calcolo dei flussi di carbonio a esse collegati (Lees *et al*, 2018).

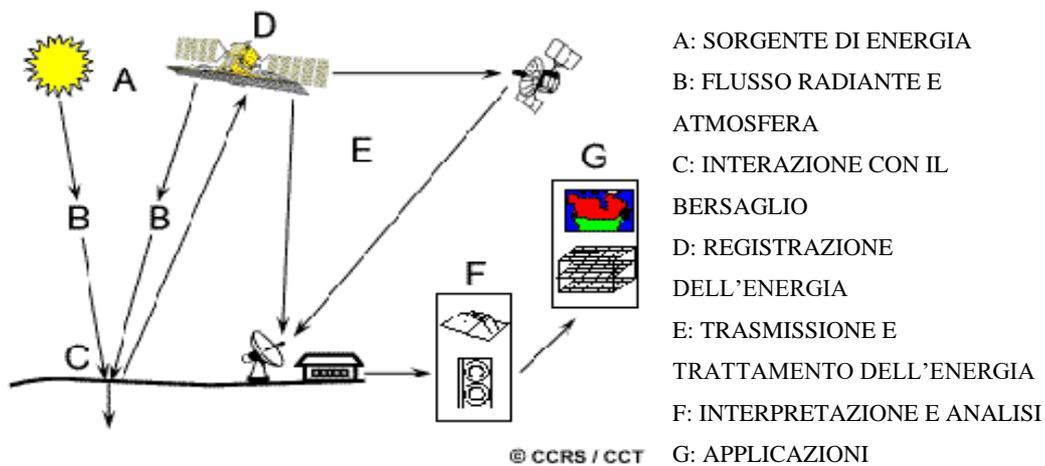


Figura 1.4: componenti del telerilevamento (CCRS, 2019).

Il processo chiave su cui si basa questa metodologia di acquisizione di informazioni è la rilevazione e registrazione, da parte di un sensore, della radiazione emessa e riflessa dall'oggetto bersaglio a intervalli spettrali specifici, chiamati bande. Di conseguenza, il requisito fondamentale per il telerilevamento è quello di avere una fonte di energia che illumina l'oggetto di interesse. In base a questo fattore si distinguono i due principali tipi di sensori: quelli passivi, che catturano la radiazione solare, la quale viene poi riflessa dall'oggetto; quelli attivi, che emettono radiazione verso la superficie da osservare, e misurano la radiazione riflessa dalla superficie dopo aver interagito con la stessa (CCRS, 2019; Gomasasca *et al*, 2001). Sia che essa provenga dal Sole, o da uno strumento in particolare, tale energia viene trasportata dalla sorgente emittente a un sistema ricevente per mezzo della radiazione elettromagnetica.

La radiazione elettromagnetica è, per definizione, costituita da un campo elettrico (E), che oscilla in modo perpendicolare alla direzione in cui la radiazione viaggia, e da un campo magnetico (M), orientato ad angolo retto rispetto al precedente e, anch'esso, perpendicolare alla direzione della radiazione. Entrambi questi campi viaggiano alla velocità della luce ($c = 300000 \text{ km/s}$) (Fig. 1.5) (CCRS, 2019) e oscillano, ovvero sono variabili nel tempo.

L'energia emessa da una sorgente, come ad esempio il Sole, per unità di tempo prende il nome di flusso radiante e si misura in W. Una volta giunta al bersaglio, tale energia segue diversi destini (Fig. 1.6). Viene riflessa, termine che descrive il fenomeno per cui

la radiazione riflessa dall'oggetto mantiene molte proprietà della radiazione incidente; trasmessa, quando l'oggetto è trasparente a una data frequenza e fa quindi passare una frazione dell'energia incidente; assorbita, cioè quando la radiazione viene assorbita dal corpo e successivamente riemessa a una lunghezza d'onda differente.

Tale concetto può essere riassunto con la seguente formula, normalizzata dividendo per l'energia incidente, per ovviare al problema dell'intensità della luce del Sole, che, non essendo costante durante la giornata, influenza il valore della radianza (o flusso radiante) in modo direttamente proporzionale:

$$\frac{\Phi_i(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)} = \frac{\Phi_r(\lambda) + \Phi_a(\lambda) + \Phi_t(\lambda)}{\Phi_i(\lambda)}$$

Lambda (λ) indica che il flusso radiante dipende dalla lunghezza d'onda che si sta esaminando. Per il principio di conservazione dell'energia, la somma dell'energia riflessa, assorbita e trasmessa deve essere uguale al flusso incidente.

Il rapporto tra il flusso che verrà riflesso (Φ_r) e il flusso radiante incidente sull'oggetto (Φ_i) è caratteristico dello specifico bersaglio e delle sue caratteristiche chimico-fisiche. Tale rapporto viene definito riflettanza e il valore è compreso tra 0 e 1.

La radiazione che quindi interessa il telerilevamento, ovvero quella che permette ai sensori posti su satelliti, radar, aerei o droni di acquisire a distanza informazioni qualitative e quantitative sugli oggetti studiati, è quella riflessa.

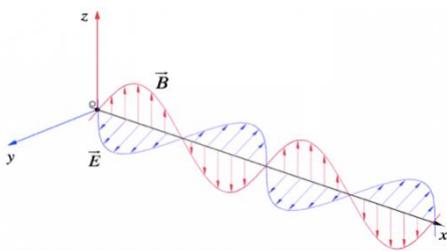


Figura 1.5: onda elettromagnetica, costituita da un campo elettrico (E) in blu e un campo magnetico (B) in rosso.

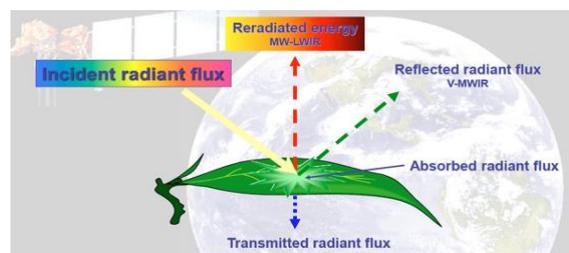


Figura 1.6: interazione energia-materia. Nell'immagine si possono notare i tre diversi destini che subisce il flusso incidente. Nel caso specifico della foglia, vengono principalmente riflessi il verde e l'infrarosso, mentre blu e rosso vengono principalmente assorbiti.

1.3.1 SPETTRO ELETTROMAGNETICO

Il principio su cui si fonda il telerilevamento è la capacità di differenziare il maggior numero di elementi possibili sul territorio (suolo, vegetazione, acqua, area urbana, ecc.), analizzando il loro differente comportamento radiometrico (Gomasca *et al.*, 2001).

Per riuscire a ottenere questo risultato è necessario osservare le caratteristiche dei target nello spettro elettromagnetico, a tutte le lunghezze d'onda di interesse, in modo da ottenere una firma spettrale specifica, caratteristica che distingue un elemento da un altro (Fig. 1.7).

Lunghezza d'onda e frequenza sono due peculiarità della radiazione elettromagnetica particolarmente importanti; infatti, onde elettromagnetiche a differente lunghezza d'onda costituiscono lo spettro elettromagnetico (Fig. 1.8). A partire dalle lunghezze d'onda più corte si trovano i raggi gamma, mentre a quelle maggiori le onde radio. La luce che i nostri occhi possono rilevare, viene definita "visibile" (VIS), e copre una minima parte dello spettro elettromagnetico, compresa nell'intervallo tra 400 nm e 700 nm.

I sensori per il telerilevamento, però, essendo più sensibili rispetto all'occhio e al cervello umano, permettono di osservare le immagini anche ad altre lunghezze d'onda. A tal proposito, le radiazioni che maggiormente vengono utilizzate da queste tecniche, oltre alla frazione nel visibile, sono:

- L'ultravioletto (UV), compreso nell'intervallo tra 100 nm e 400 nm e i cui raggi sono fortemente attenuati dallo strato di Ozono Stratosferico (O₃). Esso agisce impedendo loro di giungere sino alla superficie terrestre, causando danni alla salute. Vengono maggiormente impiegati nella spettrometria.
- L'infrarosso (IR), regione compresa tra 750 nm e 1 mm, la quale può essere ulteriormente suddivisa in base alla lunghezza d'onda in infrarosso vicino (*Near infrared* – NIR), compreso nell'intervallo tra 750 nm e 3000 nm (0.75 - 3 μm) infrarosso medio (*Mid infrared* – MIR), a lunghezze d'onda tra 3000 nm e 50000 nm (3 - 50 μm) e infine infrarosso lontano (*Far infrared* – FIR), compreso nelle lunghezze d'onda tra 50000 nm (50 μm) e 1 mm.

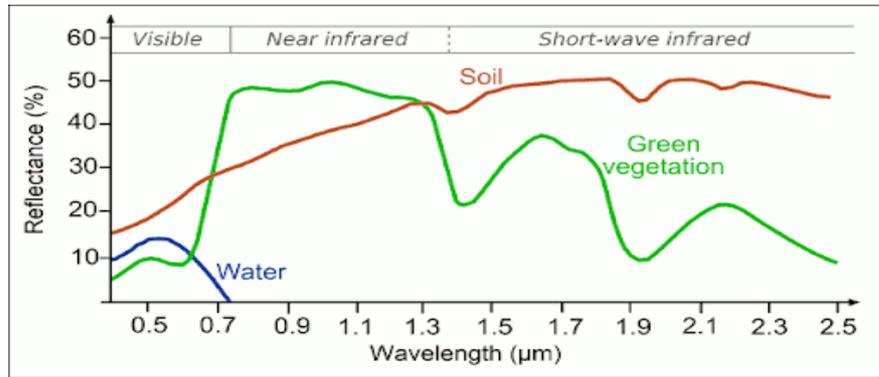


Figura 1.7: firme spettrali di suolo, vegetazione e acqua calcolate nel visibile, vicino infrarosso e nel corto infrarosso.

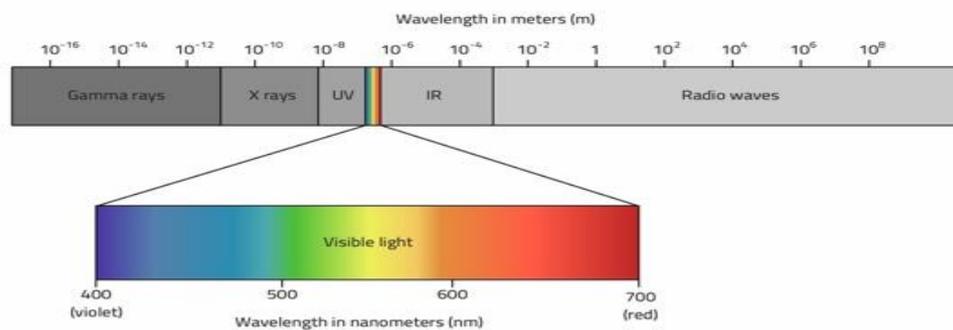


Figura 1.8: Spettro elettromagnetico della luce.

1.3.2 INFLUENZA DELL'ATMOSFERA

Un ulteriore aspetto importante da considerare nel telerilevamento è l'influenza dell'atmosfera.

L'energia elettromagnetica proveniente dal Sole passa attraverso l'atmosfera due volte: prima di arrivare al target, e poi, una volta riflessa, prima di arrivare al sensore satellitare. Questo doppio passaggio fa sì che la radiazione reagisca due volte con i gas e il vapor d'acqua che sono presenti nell'atmosfera; infatti, così come l'energia elettromagnetica subisce diversi destini quando interagisce con un corpo, anche nel caso di interazione con i gas atmosferici e il vapore acqueo la radiazione viene riflessa, rifratta, diffusa e, anche se in piccola parte, assorbita (Fig. 1.9) (CCRS, 2019).

Quello che il nostro occhio può osservare corrisponde solo a ciò che avviene all'interno della banda del visibile, ma l'atmosfera interagisce con le onde elettromagnetiche anche ad altre lunghezze d'onda.

I gas atmosferici maggiormente coinvolti sono l'ozono (O_3), l'anidride carbonica (CO_2) e il vapore acqueo ($H_2O_{(g)}$) (CCRS, 2019). Tali gas assorbono la radiazione elettromagnetica in specifiche regioni dello spettro, cioè a determinate lunghezze d'onda, che conseguentemente non potranno essere utilizzate in termini di telerilevamento.

Solo alcuni intervalli di lunghezze d'onda, definiti finestre atmosferiche (Fig. 1.10), permettono alle radiazioni di attraversare l'atmosfera, essere riflesse dalla superficie terrestre e giungere infine ai sensori.

I sensori vengono costruiti appositamente per fare osservazioni su quello che interessa, ovvero, se siamo interessati a osservare le caratteristiche della superficie, allora si costruirà uno strumento che presenta delle bande proprio per le lunghezze d'onda dove c'è la finestra atmosferica; se invece si vuole avere conoscenza dell'influenza dell'atmosfera sarà utile avere anche informazioni sulle finestre di assorbimento.

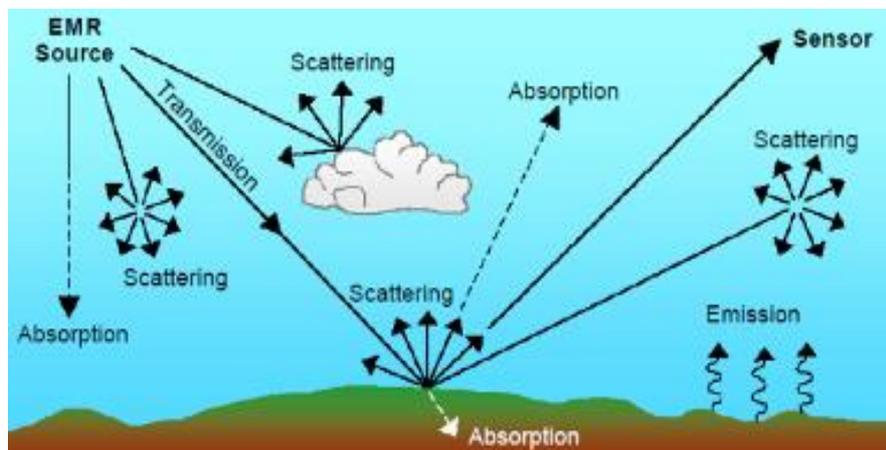


Figura 1.9: interazione tra la radiazione elettromagnetica e l'atmosfera, causata di diversi fenomeni quali riflessione, rifrazione, diffusione e assorbimento (CCRS, 2019).

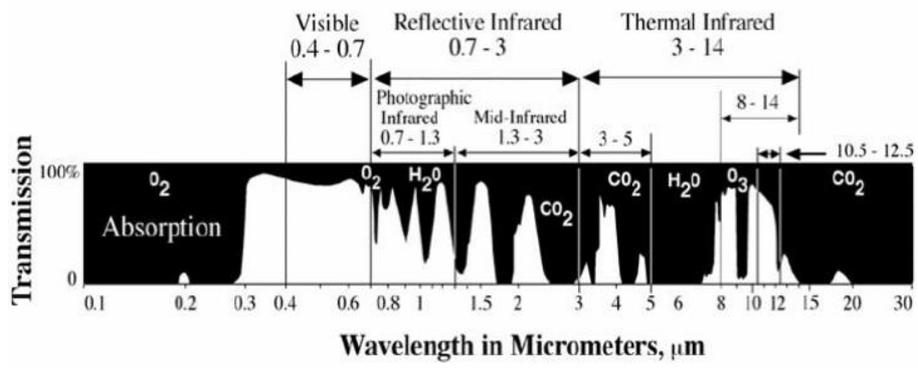


Figura 1.10: finestre atmosferiche: la colorazione bianca indica la regione dello spettro in cui l'atmosfera è trasparente, mentre nelle porzioni nere viene indicata la finestra di assorbimento (CCRS, 2019).

1.3.3 SATELLITI

I sensori, atti a catturare la radiazione emessa da un bersaglio, possono essere attivi o passivi. I sensori attivi hanno, tra i diversi vantaggi, quello di permettere misure in ogni momento e in qualsiasi condizione atmosferica, e di esaminare lunghezze d'onda che non sono fornite in maniera sufficiente dal Sole, come per esempio le microonde. Tale agevolazione non è invece disponibile con i sensori passivi, ovvero che dipendono dalla luce emessa da una sorgente terza (Sole).

Affinché il sensore possa registrare le varie informazioni, esso deve essere posto su una piattaforma stabile da ripresa, che può essere di tre tipi differenti:

- terrestre, quando lo scopo è di raccogliere informazioni dettagliate della superficie terrestre;
- aerea, attraverso l'impiego di elicotteri o velivoli;
- spaziale, grazie ai satelliti, che ruotano attorno alla Terra.

Un fattore molto importante da tenere in considerazione è che, mentre i satelliti orbitano intorno al nostro pianeta, anche la Terra è in movimento. Come conseguenza all'unione di questi due moti, quello che verrà misurato da questi strumenti è simile a uno spicchio. Molte piattaforme di telerilevamento sono progettate per seguire un'orbita precisa, tipicamente da nord a sud, ovvero quasi da un polo all'altro e, combinando questa con il movimento ovest-est della Terra, ottengono una maggiore copertura della superficie terrestre (CCRS, 2019) (Fig. 1.11).

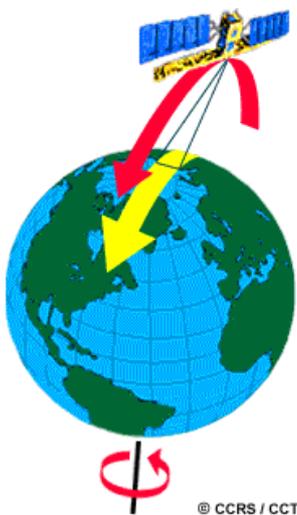


Figura 1.11: moto della Terra e del satellite combinati (CCRS, 2019).

La caratteristica che distingue i diversi satelliti di questo tipo, definiti *Near-Polar* è il tempo di rivisitazione, ovvero il tempo impiegato dal sensore per tornare al punto di partenza, eseguendo esattamente la stessa orbita. Per citare due esempi: Landsat8, gruppo di satelliti derivanti dal Programma congiunto USGS/NASA, ha un tempo di rivisitazione di 16 giorni [25]; la missione Sentinel-2, formata da una costellazione di due satelliti, i quali sono impiegati in questo specifico caso di studio, raggiunge ogni 2-3 giorni le medie latitudini e ogni 5 giorni, in condizioni di assenza di nuvole, l'equatore [23].

I satelliti presentano 4 tipi di risoluzione:

- 1- **RISOLUZIONE TEMPORALE:** è il tempo che intercorre tra rilevamenti successivi della stessa area (Schiavon & Pirotti, 2019). Viene definita dal tempo di rivisitazione del sensore e aumenta all'aumentare della latitudine. I nuovi satelliti hanno la capacità di essere orientabili e permettono quindi di riprendere la stessa area a intervalli temporali più corti.
- 2- **RISOLUZIONE SPAZIALE:** è la dimensione del pixel, ovvero l'elemento di superficie minimo osservabile dell'immagine (Khorram *et al.*, 2012). Viene definita dall'*Istantaneous Field Of View* (IFOV), che non è altro che l'angolo con cui il sensore inquadra una certa zona (CCRS, 2019). Naturalmente, in termini teorici, questo angolo, essendo fisso, farà variare la risoluzione, ovvero più ci si allontana dal suolo e maggiore sarà la zona catturata dal pixel, quindi minore sarà la qualità dell'immagine.
- 3- **RISOLUZIONE RADIOMETRICA:** la risoluzione radiometrica descrive la capacità del sistema di discriminare differenze molto piccole di intensità di radiazione elettromagnetica, tra due valori di energia limitrofi (CCRS, 2019; Schiavon & Pirotti, 2019). Per parlare di questo tipo di risoluzione, essendo collegata al concetto dei colori dell'immagine, è necessario introdurre il concetto dei bit, che rappresentano la memoria che viene fornita al pixel. La teoria base è che più bit ci sono, più si avranno scale di informazioni.

Ad esempio, se un sensore usa 8 bit per registrare i dati, si avranno a disposizione 256 valori possibili ($2^8 = 256$) per ogni banda, quindi richiederà una grande quantità di memoria, poiché l'immagine sarà molto dettagliata (Fig. 1.12). Questo tipo di risoluzione è molto importante in quanto permette di discretizzare al meglio l'oggetto bersaglio.

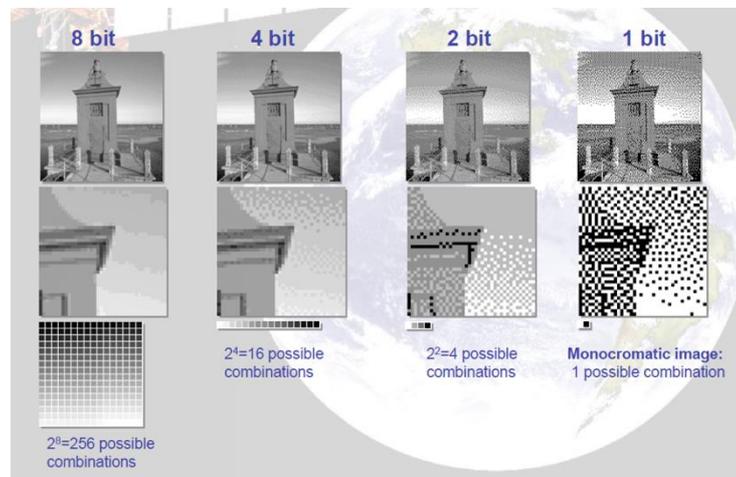


Figura 1.12: differenze di risoluzione in base al numero di bit utilizzati (CCRS, 2019).

- 4- **RISOLUZIONE SPETTRALE:** rappresenta il numero di bande, quindi di specifiche regioni dello spettro, a cui il sensore è sensibile. Questo tipo di risoluzione consente di ottenere delle immagini multispettrali, con un numero di bande variabile a seconda del sensore.

I sensori che utilizzano questo tipo di risoluzione riescono a catturare e registrare simultaneamente l'energia riflessa in diversi intervalli di lunghezze d'onda, permettendo così una migliore separazione e identificazione delle varie caratteristiche del suolo (CCRS, 2019), come diversi tipi di vegetazione, area urbana, suolo, roccia.

Talvolta, per identificare i differenti tipi di minerali, vengono utilizzati i dati iperspettrali, che catturano immagini con centinaia di bande.

Un'immagine a banda singola mostra le caratteristiche del target a varie scale di grigio, mentre, se vengono combinate più immagini a diverse bande, ad esempio una banda per il rosso, una per il blu e una per il verde, si osserverà l'immagine a colori, come la vedrebbe l'occhio umano.

1.3.4 VISUALIZZAZIONE DELL'IMMAGINE

Il telerilevamento deriva dalla tecnica che in passato veniva utilizzata per collezionare immagini del territorio da piattaforma aerea, chiamata aerofotogrammetria. Le fotografie aeree, acquisite in passato con macchine fotografiche analogiche (Fig. 1.13), sono state sostituite dalle immagini digitali, più dettagliate dal punto di vista spettrale (CCRS, 2019). Le immagini digitali sono una rappresentazione numerica dell'energia riflessa dalle superfici e catturata dal sensore della fotocamera. Tali immagini possono

quindi essere descritte come matrici di numeri, detti anche *Digital Numbers* (DNs). Il numero di matrici acquisite corrisponde al numero di bande alle quali è acquisito il dato: per le macchine fotografiche digitali, ad esempio, il sensore acquisisce una matrice di dati nella banda del blu, una nella banda del verde e una nella banda del rosso. Quando a ciascun valore di queste matrici numeriche è associata una scala di colori, le matrici potranno essere visualizzate sotto forma di immagini.

Nel caso di registrazione digitale, i pixel possono essere raccolti seguendo due tecniche. Il metodo *Whiskbroom scanner* prevede la presenza di uno specchio scanner che ruota in modo da poter raccogliere l'informazione all'interno della striscia orizzontale, perpendicolare alla direzione del sensore, in modo quasi simultaneo (Fig. 1.13). Meno utilizzato è invece il *Pushbroom scanner*, che utilizza una serie di sensori posti uno accanto all'altro in modo da coprire l'intera striscia orizzontale (CCRS, 2019).

Il Sole, come accennato in precedenza, produce uno spettro di energia a varie lunghezze d'onda, dalle più brevi ed energetiche dei raggi gamma e raggi X, a quelle più ampie delle microonde e onde radio. Per osservare un'immagine sono sufficienti tre colori: rosso, verde e blu, definiti primari perché non possono essere prodotti dalla combinazione di altri colori. Per questo motivo, quando un sensore posto su un satellite acquisisce informazioni dalla Terra, raccoglie l'energia elettromagnetica e la suddivide in matrici, una per il rosso, una per il blu e una per il verde. Alla banda del visibile, a cui appartengono tali matrici, vengono tipicamente aggiunte anche le bande nel vicino (NIR), nel corto (SWIR), nel medio (MWIR) e nel lontano (FIR) infrarosso.

A seconda dello scopo dello studio si possono poi osservare le bande singolarmente, oppure sovrapporle una all'altra, con un massimo di tre matrici per volta.

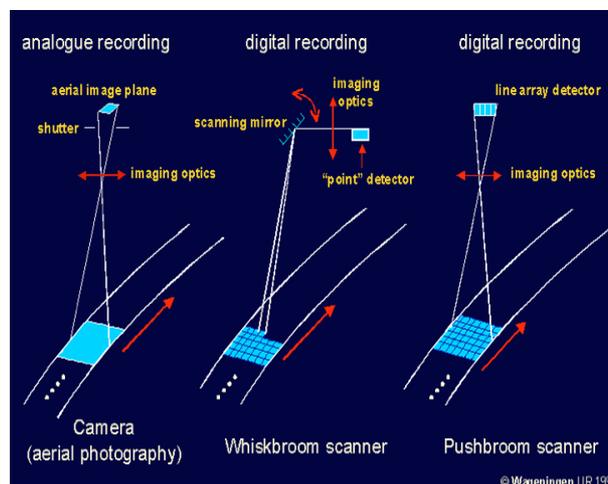


Figura 1.13: metodi di acquisizione dei dati; (a) metodo analogico e (b), (c) metodi digitali (CCRS, 2019).

2. SCOPO DELLA RICERCA

2.1 MAPPATURA DELLE TORBIERE ALPINE

Il presente lavoro di tesi, si compone di due obiettivi principali. Il primo mira, mediante l'utilizzo di dati cartografici e immagini satellitari, all'elaborazione di una metodologia per la mappatura delle torbiere alpine, anche di piccole dimensioni, presenti in parte del territorio del Trentino-Alto Adige. A tale proposito, in primo luogo, sono state selezionate 71 torbiere, individuate mediante l'utilizzo di diverse fonti di dati. Queste aree, una volta accertata la loro presenza tramite identificazione su immagini satellitari fornite dalla piattaforma *Google Earth*, sono state definite come "certe" (Fig. 2.1).

Il software QGIS è stato utilizzato per quanto concerne le fasi di identificazione e digitalizzazione delle torbiere e per lo sviluppo di maschere, successivamente applicate alle immagini in modo da oscurare le zone con una bassa probabilità di ospitare tali terreni.

Per la visualizzazione delle immagini satellitari Sentinel-2 (vedi sotto per la descrizione) e per la fase finale di classificazione, invece, è stata utilizzata l'applicazione SNAP (*Sentinel Application Platform*), elaborata dall'*European Space Agency* (ESA).

Entrambi i software sono *open source*.

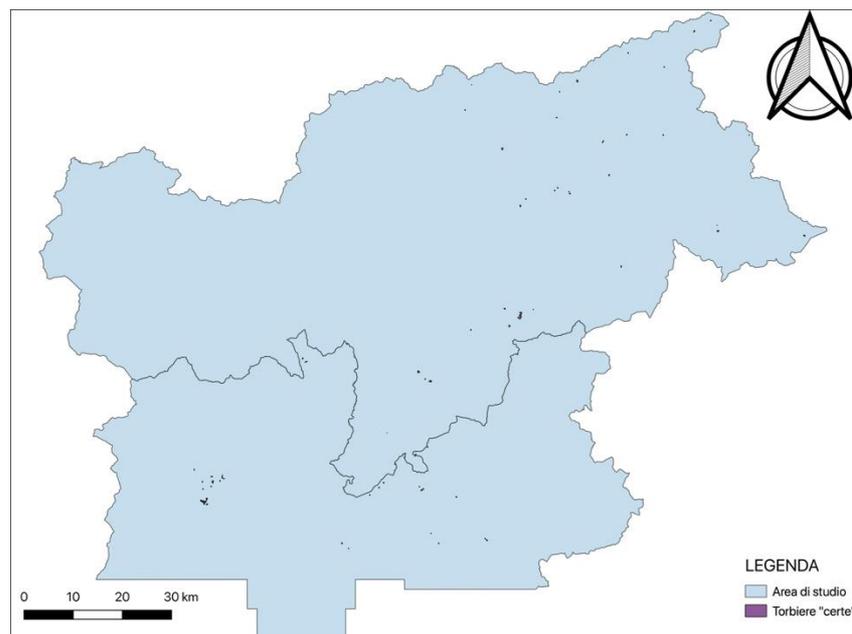


Figura 2.1: distribuzione delle torbiere "certe" all'interno dell'area di studio. – elaborazione QGIS.

2.2 STIMA DEL CARBONIO ORGANICO STOCCATO

Il secondo obiettivo prevede la stima delle quantità di carbonio organico stoccate all'interno delle torbiere. L'immagazzinamento di questa componente della sostanza organica all'interno della torba rappresenta un potenziale feedback positivo sul sistema climatico (Limpens *et al.*, 2008) in quanto, come accennato in precedenza, impedisce la formazione, mediante bio-ossidazione degli atomi di carbonio, dell'anidride carbonica, noto gas serra.

Per il raggiungimento di tale scopo, sono state selezionate quattro torbiere, la cui presenza è stata accertata mediante immagini satellitari. Da queste sono stati prelevati, attraverso carotaggi in situ, 17 campioni, successivamente analizzati in laboratorio¹. Lo studio dei campioni ha permesso di ricavare informazioni sulla *Bulk Density*², *Loss of Ignition*³ (LOI) e sull'*Organic Carbon Content by Soil Volume*.

¹ Laboratorio di chimica analitica (ITAS) e Laboratori "R. Sartori" in Via dell'Agricoltura 5, Ravenna (RA).

² Densità apparente.

³ Perdita di ignizione.

3. MATERIALI e METODI DELLA RICERCA

3.1 AREA DI STUDIO

Il progetto di studio è stato sviluppato nella zona est delle Alpi italiane, in particolare in tutta l'area della Provincia di Bolzano e nel centro-nord della Provincia di Trento, coprendo una superficie di circa 11620 km² (Fig. 3.1).

La somma delle aree delle 71 torbiere digitalizzate nelle fasi preliminari del lavoro, supera i 2000000 m² (per la precisione 2010141 m²) e di queste, 36 sono inserite nell'elenco dei Siti Rete Natura 2000², rappresentando quindi un importante patrimonio Nazionale.

Il paesaggio in esame è prevalentemente di tipo montano, con altitudine superiore a 1000 m s.l.m., costituito da boschi, prati e pascoli, mentre le reti urbanizzate coprono circa il 2% del territorio regionale [5; 18].

In generale l'area è rappresentata da tre domini-paleogeografico-strutturali, cioè settori di divisione della catena alpina, ben distinguibili a scala regionale. Elencandoli, da Nord verso Sud, si possono riscontrare il Dominio Pennidico, il Dominio Austroalpino, in entrambi i quali, abbondano le rocce di tipo metamorfico, e infine il Dominio Sudalpino (Alpi Meridionali), rappresentato per la maggioranza da rocce di tipo sedimentario (calcari e dolomie) [4].

Il Trentino-Alto Adige è una regione ricca d'acqua, sia superficiale che sotterranea [15], condizioni che possono favorire la formazione delle torbiere, ed è soggetta a escursioni termiche piuttosto rilevanti.

² Strumento di politica dell'Unione Europea per la conservazione della biodiversità, istituita ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "Habitat" [9].

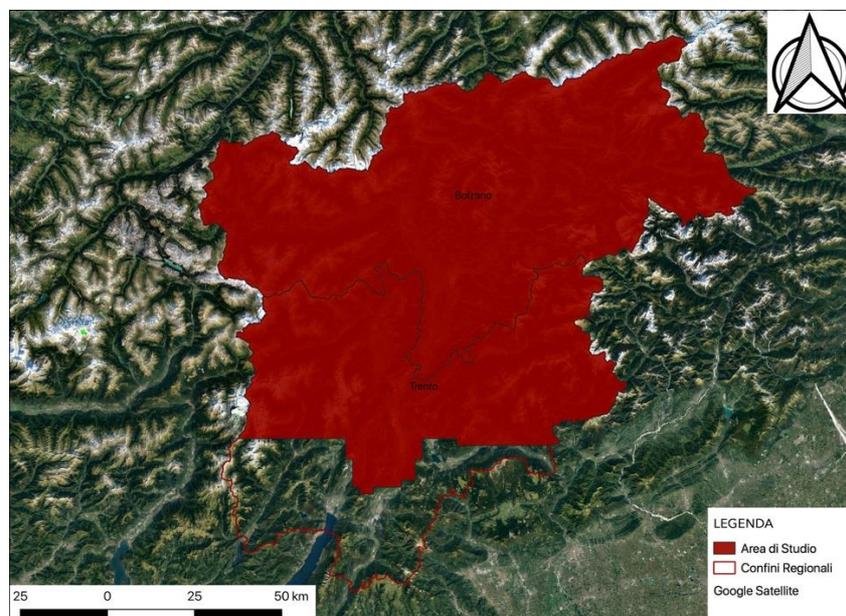


Figura 3.1: localizzazione dell'area di studio, comprendente tutto il territorio della Provincia Autonoma di Bolzano (7397 km² ca.) e la parte centro-nord della Provincia Autonoma di Trento (4222 km² ca.). – elaborazione QGIS.

3.1.1 AREA DI CAMPIONAMENTO

I 17 campioni analizzati per ottenere stime della quantità di carbonio organico stoccata sono stati prelevati nell'area dell'Alta Val Rendena (Madonna di Campiglio), in Provincia di Trento, a una quota di circa 1500 m s.l.m. (Fig. 3.2).

Sono state campionate 4 torbiere, identificate come Malga di Ritorto Nord e Sud, Lago Nambino e Genzianella (Fig. 3.3).

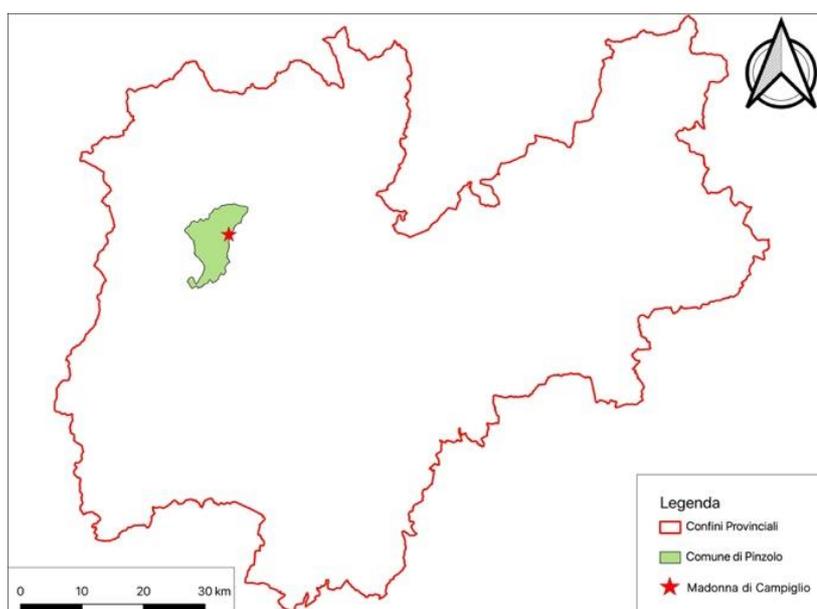
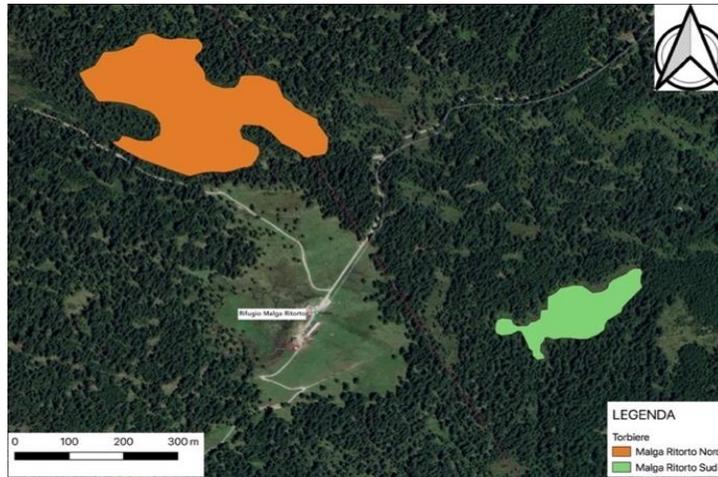
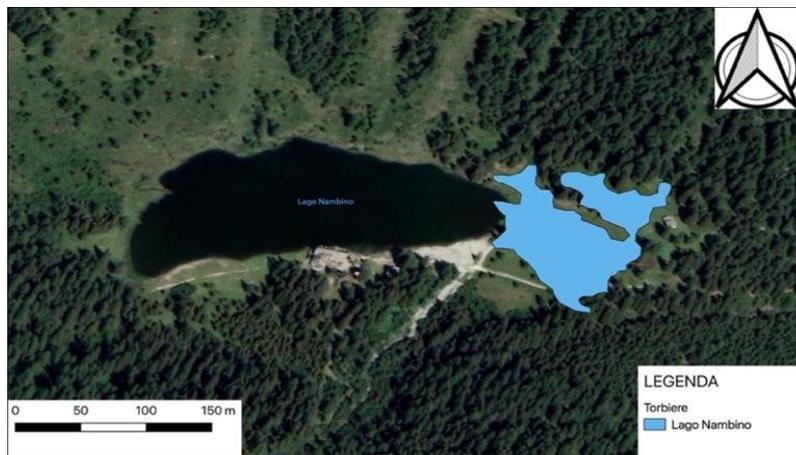


Figura 3.2: Localizzazione all'interno dei confini provinciale e comunale dell'area di campionamento, sita nei pressi di Madonna di Campiglio. – elaborazione QGIS.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.3: poligoni delle torbiere campionate a Madonna di Campiglio (TN) – elaborazione QGIS.
 (a): Torbiere Malga di Ritorto Nord (UTM32: 0639199 E, 5120009 N) e Malga di Ritorto Sud (UTM32: 06397776 E, 5119576 N).
 (a): Torbiera nei pressi del Lago Nambino (UTM32: 0639044 E, 5122708 N).
 (a): Torbiera vicino all'Albergo - Ristorante Genzianella (UTM32: 0643191 E, 5124860 N).

3.2 RACCOLTA DATI

3.2.1 BANCHE DATI

Per l'identificazione delle torbiere "certe" sono state consultate diverse fonti di dati, sia su scala regionale, che nazionale e europea:

- Geocatalogo della Provincia Autonoma di Bolzano [14];
- Siti Rete Natura 2000 [1; 16];
- Parco Naturale Vedrette di Ries-Aurina [13];
- Dati sulla copertura del suolo (Progetto *Corine Land Cover* [2]);
- Studi precedenti (Bragazza *et al.*, 2005; Martinelli *et al.*, 2012; 2013; 2015; Spitale, 2012).

Le informazioni sono state fornite nei formati vettoriale (poligoni e punti).

Dal Servizio Cartografico della Provincia Autonoma di Bolzano e dal Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento [14; 19] sono stati forniti per questo lavoro i Modelli Digitali del Terreno di tutta l'area di studio, mentre le immagini satellitari Sentinel-2 sono state acquisite dal Sistema di libero accesso Copernicus [22].

3.2.2 SOFTWARE: QGIS e SNAP

QGIS è un Sistema di Informazione Geografica professionale *Open Source*, rilasciato sotto la GNU *General Public License* ed è un progetto ufficiale della *Open Source Geospatial Foundation*. Le caratteristiche principali di questa applicazione sono che supporta e permette di gestire ed elaborare un gran numero di formati, vettoriali e raster e presenta molteplici funzionalità [20].

È interamente gestito da volontari, quali studenti, professori, programmatori e liberi professionisti e può essere scaricato e modificato, grazie alla disponibilità di ottenere il codice sorgente di QGIS.

Al suo interno possono essere compilati dei *plugin*, ovvero programmi non autonomi che interagiscono con QGIS per ampliarne le funzionalità originarie.

La versione che è stata utilizzata ai fini di questo lavoro di tesi è "3.16.0 – Hannover".

Il secondo software utilizzato è SNAP *Toolbox (Sentinel Application Platform)*, sviluppato tramite una collaborazione tra Brockmann Consult, SkyWatch e C-S. È attualmente disponibile sul sito dell'*European Space Agency*, come applicazione *Open Source* ed è rilasciato sotto licenza GNU GPL v3.

Lo scopo principale di questo strumento è quello di permettere l'elaborazione e l'analisi dei dati derivanti dall'osservazione della superficie terrestre operata dalle missioni spaziali europee Sentinel [24] ma permette l'elaborazione di dati satellitari di molte altre piattaforme.

3.2.3 DIGITALIZZAZIONE DELLE TORBIERE

Per avviare l'operazione di mappatura delle torbiere certe è stato creato uno “*shapefile*”, sul software QGIS, ossia un formato di file vettoriale usato nella mappatura GIS, che ha il ruolo di rappresentare oggetti nel mondo reale, memorizzando informazioni sulla loro posizione, sulla forma e sugli attributi, ovvero informazioni in formato testo o numerico che descrivono gli oggetti.

I dati vettoriali possono essere rappresentati con tre elementi spaziali di base, il punto, la linea o il poligono. Quando l'elemento viene rappresentato con un singolo vertice, avrà come caratteristiche solo le coordinate x, y (e talvolta z), quindi verrà considerato, nella mappa, come adimensionale. Se la geometria dell'elemento consiste in due o più vertici, dove il primo e l'ultimo hanno coordinate diverse, si ha una linea vettoriale. La sequenza di vertici chiusi, invece, è definita poligono, figura bidimensionale che, oltre alle varie coordinate, contiene l'informazione aggiuntiva dell'area.

Per questo lavoro sono stati creati 71 differenti poligoni, seguendo le aree che, dalle immagini di *Google Satellite*, delimitavano i confini delle torbiere. Tali elementi forniscono le informazioni delle aree di ciascuna torbiera e la fonte del dato (Allegato I – Tabella 3.1).

3.2.4 MODELLO DIGITALE DEL TERRENO (DTM)

I modelli digitali del terreno (*Digital Terrain Model - DTM*), con i modelli digitali della superficie - *DSM (Digital Surface Model - DSM)*, vengono raggruppati nella categoria dei modelli altimetrici del terreno (*Digital Elevation Model - DEM*).

Sia i DTM che i DSM sono superfici statistiche, ovvero una rappresentazione della distribuzione dei valori di un particolare fenomeno, definito, per ogni coppia di coordinate (x, y), da un valore di z, misurato o calcolato (DeMers, 1997; Beani *et al.*, 2019).

La differenza sostanziale tra il modello digitale della superficie e quello del terreno è che il primo rappresenta la superficie terrestre, includendo le costruzioni antropiche e

la vegetazione, mentre il modello del terreno rappresenta esclusivamente l'andamento della superficie del suolo (Fig. 3.4), a partire da una nuvola di punti (Beani *et al.*, 2019).

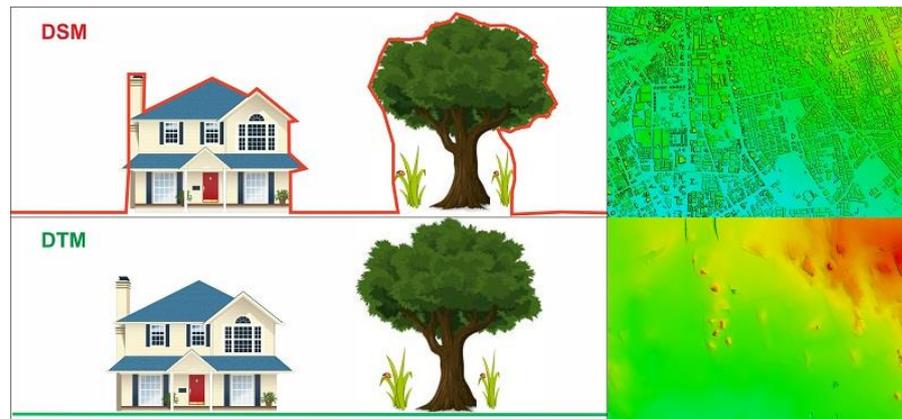


Figura 3.4: differenza tra Digital Surface Model (DSM) e Digital Terrain Model (DTM) [12].

Questo tipo di dati viene utilizzato spesso in cartografia, per la pianificazione del territorio e per la protezione ambientale, in quanto permette il calcolo, per interpolazione, della quota di un punto arbitrario del terreno. Tale caratteristica permette di distinguerli dalle curve di livello, da cui si possono ottenere, invece, informazioni di quota solo seguendo la linea (Kölbl *et al.*, 2001).

I modelli digitali del terreno utilizzati in questo studio sono stati ottenuti mediante tecnologia LiDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*). Come viene descritto sul sito del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio [8], il LiDAR è un sensore Laser, installato su un mezzo aereo, che permette di determinare la distanza tra un oggetto target e il sensore. Questa tecnica di telerilevamento attivo è composta principalmente da un trasmettitore (laser), da un ricevitore e da un sistema di acquisizione dei dati; è estremamente rapido e permette l'acquisizione di dati ad alta risoluzione [21]. Scansionando l'intera superficie terrestre, il LiDAR genera informazioni precise sulle sue caratteristiche e crea una nuvola di punti [11]. A ognuno di questi punti sono associate le coordinate x,y, e naturalmente la quota. Poiché la posizione esatta del velivolo è nota, grazie ai GPS di bordo, basta misurare il tempo che impiega la luce laser per raggiungere il bersaglio e ritornare al sensore, e moltiplicarlo per la velocità della luce (e quindi del segnale laser) per ottenere un valore pari a due volte lo spazio che separa il sensore dal target. Tale distanza serve per ubicare in modo preciso il punto del target colpito dal laser, punto al quale si associano le coordinate x, y e z [21].

I modelli digitali del terreno della Provincia Autonoma di Bolzano sono stati forniti con passo 2.5m x 2.5m, mentre i file provenienti dalla Provincia Autonoma di Trento presentavano risoluzione disomogenea: alcuni avevano risoluzione pari a 1m x 1m e alcuni 2m x 2m.

3.2.5 CREAZIONE DELLE MASCHERE

Come dimostrato da uno studio americano sulle torbiere (Loisel *et al.*, 2013), i fattori principali che influenzano l'espansione laterale delle aree di torba sono i processi idrologici, a loro volta strettamente legati ai vari aspetti del paesaggio, come topografia, pendenza e tipo di substrato. Questi fattori morfologici, infatti, influiscono fortemente sulle caratteristiche idrologiche delle torbiere. Hanno effetto sulla possibilità di accumulo dell'acqua e la direzione del suo flusso (Loisel *et al.*, 2013), sul tasso di deflusso e sulla profondità della falda (Parry *et al.*, 2015). Per tale motivo, dalle immagini raster dei modelli digitali del terreno è stata effettuata un'analisi geomorfologica del terreno, tramite l'impiego del software QGIS, che ha permesso il calcolo della pendenza dell'area studio, calcolata in gradi.

Una volta ottenuta l'immagine risultato delle varie pendenze, è stato sovrapposto lo *shapefile* delle 71 torbiere "certe". Attraverso l'utilizzo del *plugin* "RasterStats", progettato per estrarre dati dai file raster, ovvero le pendenze che cadono all'interno dell'area di un poligono, in questo caso le torbiere, è stata calcolata la statistica riassuntiva. Essa comprendeva valori di media, mediana, deviazione standard, varianza, minimo e massimo, deviazione mediana assoluta e conteggio dei pixel. Dal calcolo della media delle medie, il valore della pendenza entro cui cadono le torbiere risulta essere di circa 8.44° (gradi).

L'intervallo scelto per la realizzazione della maschera di pendenza è dato dalla seguente formula:

$$A = \bar{x} - 2 \cdot \sigma \rightarrow A = -6.22$$

$$B = \bar{x} + 2 \cdot \sigma \rightarrow B = 23.10$$

Dove:

A = valore minimo dell'intervallo

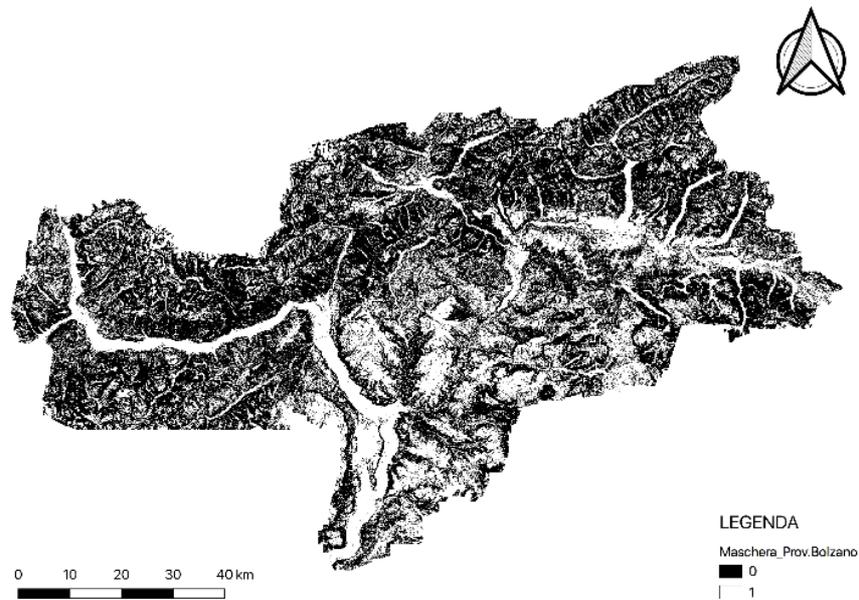
B = valore massimo dell'intervallo

\bar{x} = media delle medie

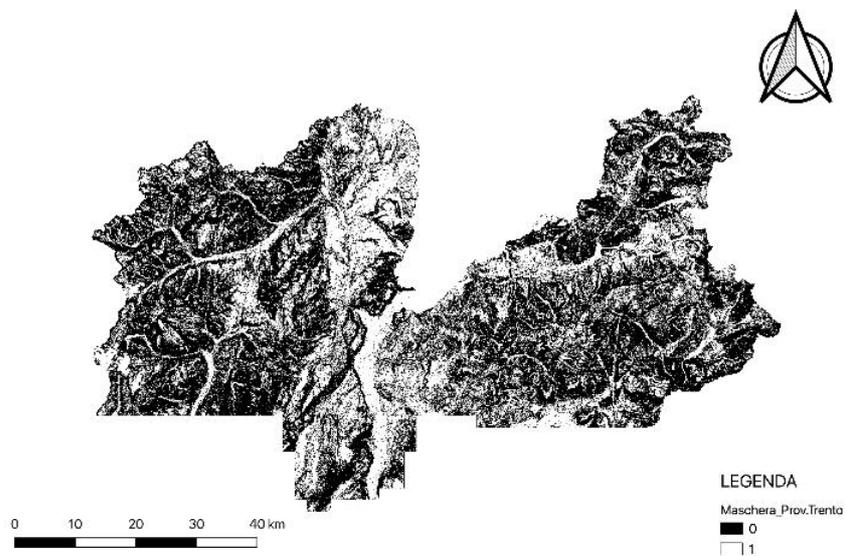
σ = deviazione standard

La deviazione standard è un indice di dispersione statistico e fornisce informazioni sulla variabilità di un set di dati numerici, rappresentando la distanza di ogni singolo valore dalla media. Più i dati sono eterogenei, più elevato sarà il valore dello scarto quadratico medio (deviazione standard).

Dallo strumento di QGIS “*Raster Calculator*” è stata sviluppata la maschera delle pendenze, con lo scopo di ottenere un’immagine binaria i cui valori possono essere 0 e 1 (Fig. 3.5 (a) e Fig. 3.5 (b)). Tutte le aree che presentano una pendenza superiore a 25° sono state mascherate, ovvero sono rappresentate dal colore nero, a cui è associato il valore 0, mentre le aree che presentano, dal punto di vista di questo parametro topografico, una probabilità di ospitare torbiere, sono bianche e presentano il valore 1. Al fine di consentire la sovrapposizione con le immagini satellitari e la loro elaborazione tramite il software SNAP, le immagini sono state normalizzate a un sistema di riferimento comune (WGS 84 – EPSG 4326) e i pixel sono stati ricampionati a 10m x 10m.



(a)



(b)

Figura 3.5: immagini raster della maschera delle pendenze della Provincia di Bolzano (a) e parte di quella di Trento (b). – elaborazione QGIS.

3.2.6: IMMAGINI SATELLITARI: SENTINEL 2

L'Agenzia Spaziale Europea (ESA, *European Space Agency*) ha sviluppato una serie di missioni satellitari attraverso Copernicus, il programma congiunto tra ESA e la Commissione Europea. Lo scopo principale del programma Sentinel è quello di rimpiazzare la precedente generazione di satelliti, che hanno concluso o stanno per concludere il loro ciclo operativo, per garantire la continuità nella fornitura di dati. Ciascuna missione è focalizzata su un diverso aspetto dell'osservazione della Terra, in particolare:

- Sentinel-1 fornisce dati radar per servizi terrestri e oceanici;
- Sentinel-2 fornisce immagini multispettrali ad alta risoluzione per il monitoraggio del territorio, fornisce immagini ottiche della vegetazione, del suolo e della copertura idrica, sia interna che delle aree costiere e per servizi di emergenza;
- Sentinel-3 è una missione multistrumentale atta a misurare la topografia, il colore e la temperatura della superficie del mare e della terra;
- Sentinel-4, 5P e 5 forniscono dati su una moltitudine di gas e aerosol in traccia che influenzano la qualità dell'aria e il clima;
- Sentinel-6 ha il compito di misurare l'altezza globale della superficie del mare, principalmente per l'oceanografia operativa e per gli studi climatici.

La missione Sentinel-2, sulla quale si basa il presente studio è costituita da una costellazione di due satelliti identici con orbita *Near-polar*, collocati quindi nella stessa orbita, ma posti a 180° l'uno dall'altro, caratteristica che permette a questa tipologia di sensori di accorciare il tempo di rivisitazione. Infatti, il tempo impiegato da un solo satellite per compiere un'orbita attorno alla Terra e tornare al punto di partenza, posto sull'equatore, è di 10 giorni; se si aggiunge il secondo satellite tale valore si dimezza [23].

I satelliti non sono stati lanciati in orbita nello stesso periodo, bensì a due anni di distanza l'uno dall'altro, il primo (S2A) nel 2015 e il secondo (S2B) nel 2017.

Questa coppia di satelliti permette di ottenere immagini multispettrali ad alta risoluzione. Sentinel-2 acquisisce infatti 13 bande, quattro delle quali presentano risoluzione spettrale di 10 m, sei bande a 20 m e tre bande a 60 m (Tab. 3.2).

Band Number	S2A		S2B		Spatial resolution (m)
	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	Central wavelength (nm)	Bandwidth (nm)	
1	442.7	21	442.3	21	60
2	492.4	66	492.1	66	10
3	559.8	36	559.0	36	10
4	664.6	31	665.0	31	10
5	704.1	15	703.8	16	20
6	740.5	15	739.1	15	20
7	782.8	20	779.7	20	20
8	832.8	106	833.0	106	10
8a	864.7	21	864.0	22	20
9	945.1	20	943.2	21	60
10	1373.5	31	1376.9	30	60
11	1613.7	91	1610.4	94	20
12	2202.4	175	2185.7	185	20

Tabella 3.2: bande spettrali comprese in Sentinel-2A e Sentinel-2B [23].

Lo strumento multispettrale (*MultiSpectral Instrument*) acquisisce immagini tramite il concetto *Pushbroom scanner* (Capitolo 1.3.4 - Visualizzazione dell'immagine), ovvero mentre il satellite compie la sua orbita attorno alla Terra, raccoglie una fascia di dati della superficie terrestre, a larghezza costante. La registrazione della radiazione riflessa dalla Terra avviene grazie alla presenza di un telescopio, formato da tre specchi (M1, M2 e M3) [23].

Le immagini Sentinel-2 relative all'area presa in considerazione in questo studio sono state scaricate dal sito *Copernicus Open Access Hub* [22]. La ricerca si è incentrata sulle immagini satellitari fornite dal 2017 a oggi, catturate nei mesi primaverili ed estivi (marzo – settembre). Sono state selezionate quattro immagini che rispettavano i parametri richiesti, ovvero scarsa copertura nivale e presenza nulla o minima di nuvole (Fig. 3.6).

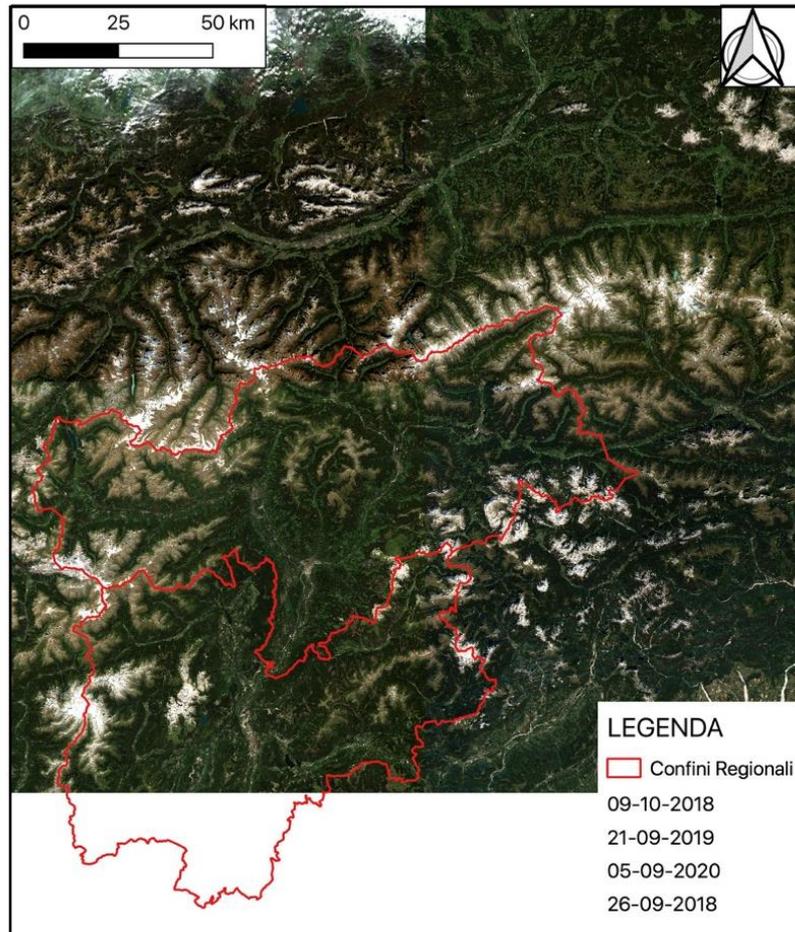


Figura 3.6: immagini satellitari Sentinel-2 unite, in modo da coprire l'intera area di studio. In legenda le date di acquisizione [22].

In una prima elaborazione delle immagini, al fine di facilitare la fase di classificazione (Capitolo 4.5 - Classificazione sulle immagini con 10, 11 e 12 bande), tutte le bande spettrali sono state ricampionate a 10 m, in modo da ottenere uniformità dei dati. Questo vuol dire che i pixel a risoluzione 20m x 20m sono stati divisi per quattro, in modo da ottenere quattro pixel a risoluzione 10m x 10m. Un'ulteriore modifica è stata applicata alle bande dello spettro elettromagnetico, infatti ne sono state mantenute solo 10 (Fig. 3.7).

SENTINEL 2 BANDS
Band 2 - Blue
Band 3 - Green
Band 4 - Red
Band 5 - Vegetation Red Edge
Band 6 - Vegetation Red Edge
Band 7 - Vegetation Red Edge
Band 8 - NIR
Band 8A – Vegetation Red Edge
Band 11 - SWIR
Band 12 - SWIR

Figura 3.7: elenco delle bande prese in considerazione nello studio.

3.3 ANALISI DEI DATI

3.3.1 CORREZIONE GEOMETRICA

Le immagini che vengono catturate dai satelliti seguono diverse fasi di pre-elaborazione, coinvolgendo le operazioni di norma richieste prima dell'analisi vera e propria dei dati. I due tipi principali di preparazione delle immagini sono la (i) correzione radiometrica, che tiene conto degli effetti delle caratteristiche del sensore e degli elementi che possono creare disturbo nella cattura della radiazione riflessa, e la (ii) correzione geometrica, che considera le distorsioni causate dal fatto che si cerca di rappresentare, attraverso un'immagine bidimensionale, la superficie della Terra (CCRS, 2019).

Nel caso specifico della missione Sentinel-2, al Livello 1B viene effettuata una prima correzione radiometrica, la quale consente di ottenere un insieme di dati omogeneo con indagine degli errori formati durante la scansione della scena. Segue, al livello 1C, la correzione geometrica, ovvero ortorettifica e georeferenziazione nel sistema di riferimento UTM/WGS 84 [23].

Le distorsioni geometriche sono molto frequenti nelle immagini satellitari e sono causate principalmente da (Schowengerdt, 2007; CCRS, 2019):

- Angolo di ripresa del sensore;
- Instabilità della piattaforma;
- Altitudine, assetto e velocità della piattaforma;

- Morfologia del terreno;
- Curvatura e rotazione della Terra.

In dettaglio, la georeferenziazione rende l'immagine piana rispetto al sistema che è stato preso come riferimento, mentre l'ortorettifica permette di tenere in considerazione anche l'angolo di ripresa del sensore e della topografia del terreno.

Essendo le immagini Sentinel-2 corrette geometricamente e radiometricamente, non è stata effettuata alcuna elaborazione successiva.

3.3.2 CORREZIONE ATMOSFERICA

In accordo con quanto discusso nel Capitolo 1 – Introduzione, la radiazione emessa e riflessa viene influenzata dall'atmosfera, specie dai gas atmosferici, dall'aerosol e dal vapore acqueo. A tal proposito, il processore *Sen2Cor*, sviluppato da Telespazio VEGA Deutschland GmbH, per conto dell'ESA, presenta, come scopo principale, quello di correggere i prodotti di livello 1C “*Top-Of-Atmosphere*” (TOA) dagli effetti dell'atmosfera e di fornire un prodotto finale di livello 2A, ovvero immagini che riportano la misura della riflettanza al “*Bottom-Of-Atmosphere*” (BOA) [23]; (Main-Knorn *et al.*, 2017) (Fig. 3.8).

Grazie a questo algoritmo, l'immagine Sentinel-2 è stata fornita da ESA già corretta atmosfericamente.



Figura 3.8: differenza tra l'immagine Sentinel-2 Livello 1C (sinistra) e l'immagine Sentinel-2 Livello 2A (destra), corretta atmosfericamente [23].

3.3.3 ELABORAZIONE DELLE IMMAGINI DIGITALI

Una volta ottenuta l'immagine Sentinel-2, ai fini di agevolare l'interpretazione e la ripartizione delle diverse componenti nelle classi scelte a priori e utilizzate nella fase finale di classificazione, è stata effettuata una elaborazione. Questa operazione, di norma, richiede diversi passaggi, come la formattazione, la correzione dei dati e il miglioramento delle qualità visive dell'immagine (CCRS, 2019).

L'immagine Sentinel-2 non ha richiesto molte elaborazioni, tuttavia è stata osservata con combinazioni differenti delle bande spettrali attraverso il modello additivo RGB, acronimo di *Red*, *Green* e *Blue* (Fig. 3.9). Tale modello si basa sul fatto che questi colori, definiti primari, se combinati tra loro, permettono di osservare l'immagine a colori naturali, ovvero come sarebbe visibile all'occhio umano (Fig. 3.10).

Riprendendo brevemente il concetto dei bit, accennato nel paragrafo "1.3.3 - Satelliti", i pixel possono avere, a seconda della risoluzione radiometrica del sistema, diverse profondità di bit. Le immagini RGB sono composte da tre canali di colore, uno per il rosso, uno per il verde e uno per il blu. Un'immagine a 8 bit avrà quindi, per ciascun canale, 256 possibili valori (*digital numbers*) (Lillesand *et al.*, 2015); sarà quindi a colori e piuttosto dettagliata.

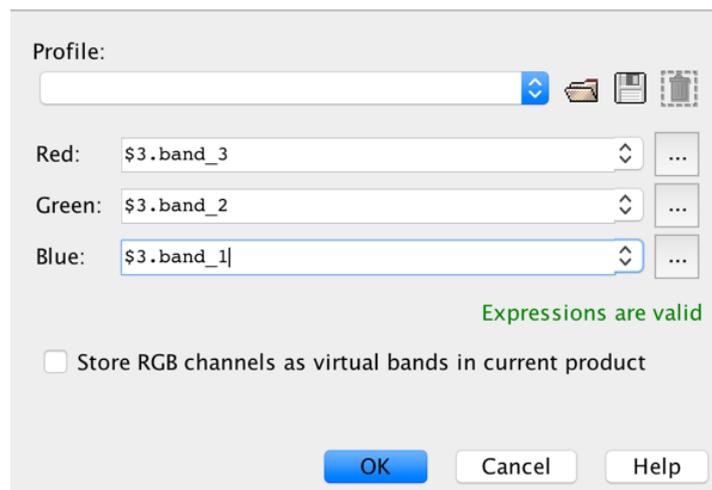


Figura 3.9: parametri compilati in SNAP per l'osservazione dell'immagine.



Figura 3.10: ritaglio dell'immagine satellitare Sentinel-2, osservata nella combinazione di colori "colore naturale" RGB (4,3,2). – elaborazione SNAP.

Per separare i diversi tipi di vegetazione nelle classi definite “bosco”, “prato” e “seminativo 1, 2, 3, 4”, l'immagine è stata osservata all'infrarosso in falso colore (Fig. 3.11), ovvero combinando le bande RGB (8,4,3). In questo caso si sfrutta la caratteristica della vegetazione di riflettere il vicino infrarosso (banda 8) e la luce verde (banda 3) e di assorbire il rosso (banda 4). Più lo strato di vegetazione è denso, più la colorazione rossa sarà intensa, come nel caso specifico della classe “bosco”, rappresentata da piante di tipo arboreo.

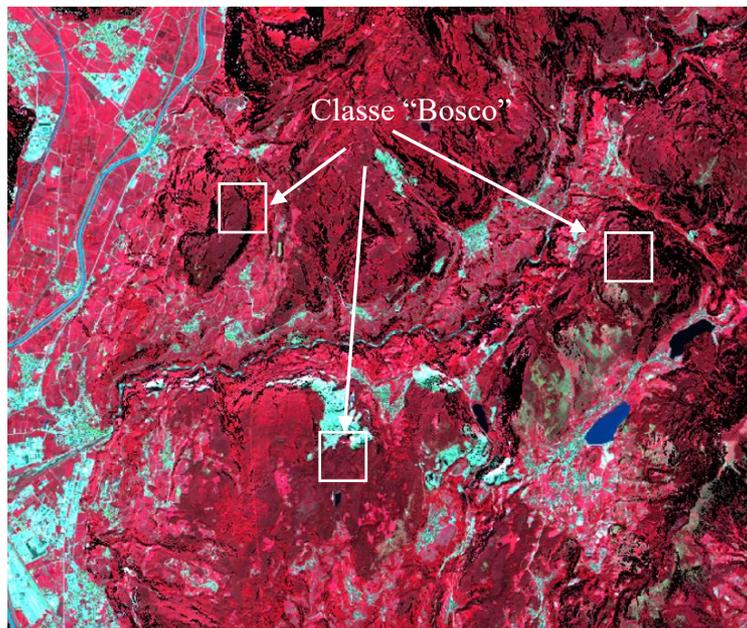


Figura 3.11: ritaglio dell'immagine satellitare Sentinel-2, osservata con combinazione di colori "Infrarosso in falso colore" RGB (8,4,3). – elaborazione SNAP.

In ultimo sono state effettuate altre due osservazioni, questa volta dell'infrarosso a onda corta (SWIR), rispettivamente con la banda 11 e 12 (Fig. 3.12 (a); Fig. 3.12 (b)). Questi tipi di bande vengono riflesse dall'acqua e proprio per tale ragione vengono di norma utilizzate per stimare la presenza di acqua in zone con copertura vegetale e suolo nudo.

L'immagine Sentinel-2 è stata infine ritagliata con lo scopo di estrarne una porzione, in modo da facilitare e velocizzare il processo di classificazione. È stata selezionata un'area che fosse il più possibile rappresentativa della zona di studio, ovvero che contenesse un numero significativo di elementi di tutte le classi scelte.

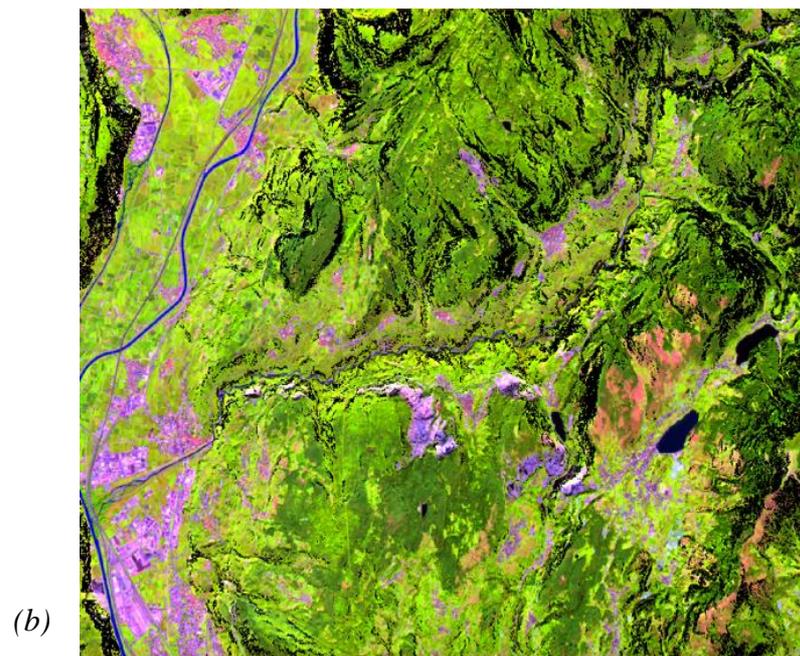
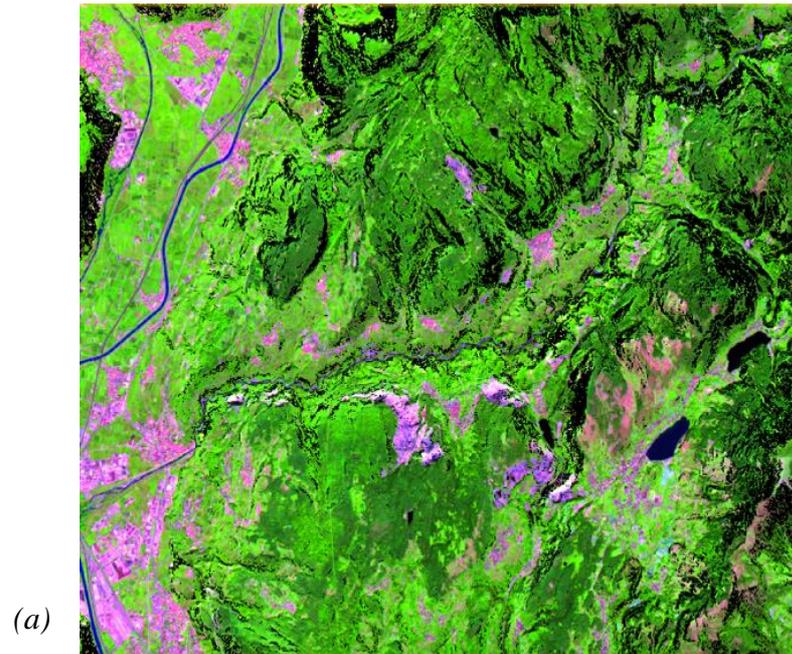


Figura 3.12: (a) combinazione definita "SWIR" RGB (12,8,4), che permette di osservare la vegetazione nelle varie tonalità di verde, l'area urbana in viola e il suolo in rosso. (b) combinazione RGB (11,8,2) utilizzata soprattutto per monitorare le colture. – elaborazioni SNAP.

3.3.4 CLASSIFICAZIONE RANDOM FOREST

La classificazione è un processo che ha lo scopo di categorizzare i pixel di un'immagine in diverse classi di copertura del suolo (Lillesand *et al.*, 2015), valutando gli elementi che compongono l'immagine, sulla base di diversi criteri di "similarità".

Nella classificazione, possono essere possibili due procedimenti basati su:

1. Le caratteristiche morfologiche dell'oggetto. Questo approccio ripartisce nella stessa classe tutti gli oggetti che presentano caratteristiche morfologiche simili. È un metodo spesso utilizzato in cartografia, per lo sviluppo delle carte tecniche.
2. Le firme spettrali dell'oggetto. Procedimento che raggruppa gli oggetti in base alle firme spettrali delle varie bande dello spettro elettromagnetico considerate.

Questa classificazione può essere di due tipi:

- a) *Supervised classification* o classificazione guidata, è il tipo di classificazione più utilizzato per l'analisi delle immagini da telerilevamento. Essendo guidata, necessita che il numero e la tipologia delle classi che si trovano all'interno dell'immagine venga esplicitato (Brivio *et al.*, 2006).
- b) *Unsupervised classification* o classificazione non guidata, effettua la suddivisione delle componenti di un'immagine in base al principio secondo cui oggetti simili presentano risposte spettrali simili. Individua quindi il numero di classi senza che ne sia stata fornita l'identità e il numero a priori (Brivio *et al.*, 2006).

L'immagine Sentinel-2 è stata classificata attraverso l'algoritmo di *machine learning* "Random Forest".

La scelta di questo metodo di classificazione guidata è dovuta principalmente al fatto che consente una classificazione ad alta precisione (Breiman, 2001). Si basa su una combinazione di modelli predittivi, definiti alberi decisionali (o *Decision Trees*), che formano la cosiddetta "foresta" (Yang *et al.*, 2020) e che dividono i pixel dell'immagine nelle classi che sono state scelte [6].

Ogni albero è formato da un insieme di nodi, connessi tra loro mediante archi e quando non vi sono ulteriori archi in uscita dal nodo, questo viene definito "foglia" e rappresenta la parte terminale dell'albero, ovvero la previsione finale.

Dato un insieme di pixel, detti verità a terra (*Region Of Interest* – ROI), la cui appartenenza alle diverse classi di informazione è nota, viene effettuato un *training* dell'algoritmo. Quest'ultimo ha lo scopo di addestrare la procedura a riconoscere le

varie categorie di copertura del suolo (Brivio *et al.*, 2006) in cui suddividere tutta l'immagine, nel processo di classificazione. L'addestramento viene eseguito alimentando ogni albero con la firma spettrale e la rispettiva classe associata, per ogni pixel costituente le verità a terra (Yang *et al.*, 2020).

La struttura dell'albero decisionale è basata su regole binarie (*best split*), quindi a ogni nodo verrà posta una domanda sulle caratteristiche dei dati di input, le cui risposte possibili sono "Vero - Falso" [6] (Fig. 3.13).

Ad ogni nodo si impone che il livello di impurità Gini ($G(I)$) sia più piccolo possibile: Gini infatti rappresenta la probabilità che un campione scelto a caso venga etichettato in modo errato nel nodo specifico [6]. Questa impurità viene definita come (Yang *et al.*, 2020):

$$G(I) = 1 - \sum_{i=1}^n p_i^2$$

Dove:

p_i = frequenza di occorrenza della classe i -esima tra le n classi totali.

Il valore più alto dell'impurità, $G(I) = 1 - \frac{1}{n}$ indica che ogni classe è equamente distribuita nei due gruppi di divisione del nodo, mentre il valore minimo di $G(I)$ mostra che tutti i pixel, in quel nodo, appartengono a una sola classe (Yang *et al.*, 2020). A ogni nodo, l'albero decisionale cerca, tra le caratteristiche discriminative, quella che permette di massimizzare la diminuzione di impurità [6].

Il nome "*random*" deriva dal termine *bootstrap aggregating* o *bagging*, il quale indica che ogni albero della foresta viene addestrato solo su 2/3 dell'intero set di dati di addestramento [3]; (Yang *et al.*, 2020). Quelli esclusi (*out of bag*) vengono utilizzati come set di validazione, per testare la capacità di predizione di quell'albero (Yang *et al.*, 2020).

Dopo l'addestramento, quando un pixel di classe sconosciuta viene inserito all'interno del modello, ogni albero costituente la foresta, il cui numero è deciso dall'utente, effettuerà una votazione sulla classe migliore. Il classificatore registrerà il numero di voti di ciascun albero e assegnerà il pixel alla classe più votata. Questo vuol dire che,

se è stato scelto un numero di 500 alberi decisionali, il pixel sarà classificato nella categoria che riceve il maggior numero di voti da questi alberi [3].

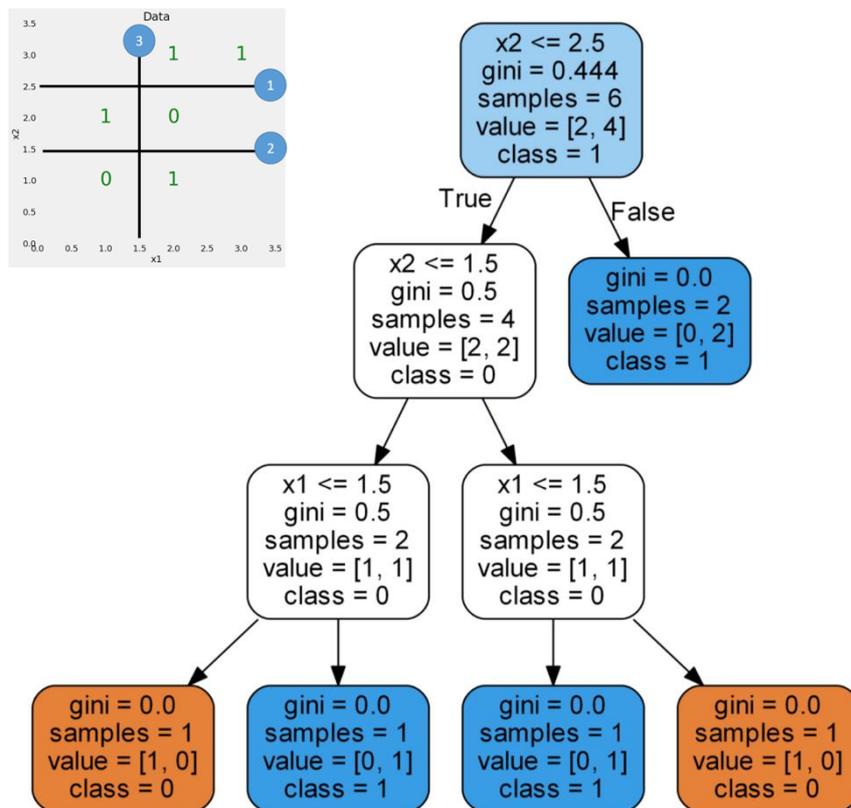


Figura 3.13: struttura dell'albero decisionale in cui "x2 e x1" sono i valori dei campioni sulle due caratteristiche discriminate scelte da questo albero, "gini" rappresenta l'impurità del nodo, "samples" sono i numeri di osservazioni presenti nel nodo, "value" costituisce il numero di campioni in ogni classe e infine "class" è la classificazione maggioritaria per i punti del nodo e, nel caso del nodo finale, rappresenta la previsione finale [6].

Per avviare il processo di classificazione, nelle immagini satellitari sono stati selezionati un numero variabile di poligoni, appartenenti a 12 diverse classi (Tab. 3.3), rappresentative delle caratteristiche della copertura del suolo. Questi insiemi di pixel costituiscono le verità a terra, ovvero le zone di *training*.

Le verità a terra sono state scelte seguendo alcune linee guida (Brivio *et al.*, 2006):

- In aree omogenee, rappresentative della classe;
- In zone diverse, coprendo l'intera immagine, in modo da rappresentare la variabilità all'interno della stessa;
- In numero sufficiente per garantire dei buoni risultati.

CLASSE	IMMAGINE SENTINEL-2A	IMMAGINE RITAGLIO
ACQUA	50 POLIGONI	20 POLIGONI
BOSCO	60 POLIGONI	40 POLIGONI
MASCHERA	50 POLIGONI	20 POLIGONI
NEVE	50 POLIGONI	20 POLIGONI
PRATO	50 POLIGONI	34 POLIGONI
ROCCE	50 POLIGONI	50 POLIGONI
SEMINATIVO 1	50 POLIGONI	60 POLIGONI
SEMINATIVO 2	50 POLIGONI	60 POLIGONI
SEMINATIVO 3	50 POLIGONI	60 POLIGONI
SEMINATIVO 4	50 POLIGONI	60 POLIGONI
SUOLO	50 POLIGONI	20 POLIGONI
TORBIERE	47 POLIGONI	24 POLIGONI
URBANO	60 POLIGONI	25 POLIGONI

Tabella 3.3: numero di poligoni (verità a terra) selezionati per ogni classe di appartenenza.

Le caratteristiche discriminative delle classi sono rappresentate dalle diverse firme spettrali dei poligoni alle bande dello spettro elettromagnetico selezionate, ovvero bande del blu, verde, rosso, margine rosso, vicino infrarosso e infrarosso a onda corta. Questo perché, a seconda dell'elemento che viene osservato e delle radiazioni coinvolte, possono esserci diversi meccanismi di assorbimento, trasmissione e riflessione (CCRS, 2019). Di conseguenza, ogni oggetto presenterà la propria firma spettrale e, in questa classificazione, firme spettrali simili verranno raggruppate insieme.

Le classificazioni di prova, effettuate prima di ottenere il risultato finale, hanno permesso di individuare le classi più soggette a errore, come “bosco”, “prato”, “rocce”, “suolo” e “urbano”, classi per le quali è stato incrementato il numero di verità a terra.

Le aree coperte da seminativo, spesso sottostimate, sono state suddivise in quattro classi, seguendo la differente colorazione del suolo, prova di colture differenti.

I poligoni pertinenti alle “torbiere” sono stati creati a partire dalle torbiere “certe” digitalizzate in precedenza, che cadevano nell'area compresa all'interno dell'immagine satellitare, ovvero 47 per l'immagine intera e 24 per l'immagine ritagliata. I pixel qui inclusi rappresentano solo la metà della loro effettiva estensione; ciò ha consentito, nella fase di validazione del metodo, l'inserimento di Pin (*Pin Placing Tools*) che individuano

pixel indipendenti dalle verità a terra (Capitolo 3.4 - Validazione del metodo tramite matrice di errore).

A causa della risoluzione di 10 m dell'immagine Sentinel-2, non è stato possibile effettuare una separazione degli elementi costituenti alcune classi. Per tale ragione la *cluster* "acqua" è composta da poligoni di acque fluviali e laghi, mentre quella "urbano" da tutte le costruzioni antropiche, senza distinzione tra case, strade, ecc.

Una volta individuato il numero di verità a terra, è stato avviato il processo di *Random Forest*, valutando i seguenti parametri (Fig. 3.14):

- "Evaluate Feature Power Set", parametro che permette di esplorare tutte le combinazioni delle bande, verificandone l'accuratezza, per poi scegliere il metodo migliore. Ad esempio, se vengono selezionate nel *run* le bande da 2 a 7, verranno esplorate tutte le combinazioni delle 7 bande in modo da trovarne una e valutarla come migliore.

Per la classificazione sull'immagine Sentinel-2 sono state usate tutte le bande considerate, quindi è stata scelta l'opzione "Evaluate classifier".

- "Number of training samples" indica invece il numero di pixel all'interno dei poligoni di allenamento che vengono selezionati casualmente, per poi procedere con il *training*. A tal proposito risulta preferibile usare un numero alto di pixel, in modo che non vengano individuati sempre i medesimi per fare il *training*. Per questo parametro è stato scelto un numero di 5000 pixel per l'immagine completa e di 6000 per l'immagine ritagliata.
- "Number of trees" definisce infine il numero alberi decisionali scelti per la classificazione. Per questo parametro sono stati scelti valori di 200 per l'immagine completa e 600 per l'immagine ritaglio.

Classifier

Train and apply classifier newClassifier

Load and apply classifier newClassifier

Train on Raster Train on Vectors

Evaluate classifier

Evaluate Feature Power Set

Min Power Set Size: 2 Max Power Set Size: 7

Number of training samples: 5000

Number of trees: 10

Figura 3.14: parametri richiesti per avviare il processo di classificazione in SNAP.

3.4 VALIDAZIONE DEL METODO TRAMITE MATRICE DI ERRORE

Al termine del processo di classificazione è essenziale documentare l'accuratezza con la quale il classificatore ha classificato i vari pixel dell'immagine. L'accuratezza viene definita come la misura del grado di corrispondenza tra uno standard, assunto come corretto e l'immagine classificata dall'algoritmo.

Uno dei metodi più comuni per esprimere il grado di accuratezza della classificazione consiste nello sviluppo di una matrice di errore (o matrice di confusione) (Lillesand *et al.*, 2015).

Nel caso specifico la validazione del metodo *Random Forest* è stata effettuata valutando la classificazione di 50 Pin per categoria di copertura del suolo (scelti in modo indipendente dalle ROIs utilizzate in fase di calibrazione) per un totale di 650 Pin, le cui classi di appartenenza sono state definite a priori.

Lo scopo delle matrici di errore è quello di confrontare, per ogni categoria, la relazione tra il gruppo di dati indipendenti appartenenti alle classi definite sulla base di verità a terra, e i corrispondenti risultati della classificazione automatica (Lillesand *et al.*, 2015).

Il prodotto finale sarà una matrice quadrata, costituita da tante colonne e righe quante sono le classi definite nei dati di input. Le colonne rappresentano le classi di copertura del suolo usate come dati di riferimento per la validazione, mentre le righe corrispondono ai pixel disposti all'interno di quella categoria dal classificatore *Random Forest*.

I pixel correttamente classificati sono rappresentati dalla diagonale e gli elementi posizionati al di fuori di essa rappresentano gli errori di commissione o omissione. Questi ultimi sono gli elementi colonna che si trovano al di fuori della diagonale, ovvero i pixel che dovevano essere classificati all'interno della specifica classe della colonna. Gli errori di commissione sono invece i dati riga costituiti dai pixel che vengono erroneamente inseriti all'interno della classe rappresentativa della riga.

Sommando i valori colonna il risultato dovrà corrispondere al numero di Pin che sono stati inseriti per il processo di validazione, mentre la somma delle righe rappresenta il numero di pixel che, per il classificatore, rientrano in quella categoria di copertura del suolo.

Il calcolo della matrice di errore permette di ricavare diverse misure di accuratezza.

L'accuratezza totale, chiamata *Overall Accuracy*, del metodo di classificazione *Random Forest* è stata calcolata dividendo il numero di pixel classificati correttamente per il numero di pixel totali di riferimento (Lillesand *et al.*, 2015). L'accuratezza di

classificazione dei pixel di riferimento della categoria torbiere all'interno della classe esatta è stata calcolata dividendo il numero di pixel correttamente classificati per il numero totale di pixel rappresentativi della classe (Lillesand *et al.*, 2015). Queste due misure rappresentano la probabilità che un pixel venga classificato correttamente.

Ulteriori valori di accuratezza sono: (i) accuratezza dell'utente (UA: *User Accuracy*), calcolata come il rapporto tra il numero di pixel correttamente classificati nella classe e il numero di pixel classificati in quella specifica categoria (somma della riga); (ii) accuratezza del produttore (PA: *Producer Accuracy*), ricavata dal rapporto tra il totale dei pixel classificati correttamente di una specifica classe e il numero totale dei pixel di riferimento della classe stessa (totale colonna) (Lillesand *et al.*, 2015).

L'accuratezza dell'utente indica la probabilità che un pixel scelto casualmente nella classe definita dal classificatore, appartenga alla classe dei dati di riferimento. L'accuratezza del produttore indica, invece, la probabilità che i pixel di riferimento vengano classificati correttamente dall'algoritmo (Story & Congalton, 1986; Liu *et al.*, 2007).

Collegato all'accuratezza dell'utente, può essere calcolato anche l'errore di commissione, definito come la probabilità che il pixel sia stato classificato in modo errato, mentre l'errore di omissione, associato all'accuratezza del produttore, indica la probabilità che un pixel sia stato classificato nella classe di riferimento corretta.

Un punto fondamentale da considerare, nella valutazione dell'accuratezza è che anche una classificazione casuale dei pixel può portare ad alcune assegnazioni corrette. Per tenere conto di questo fattore, nella validazione del metodo viene spesso calcolata la statistica "Kappa" (o coefficiente di accordo k), sviluppato da Cohen (1960) e introdotto solo successivamente nell'ambito del telerilevamento. Questo coefficiente ha lo scopo di indicare quanto i valori corretti di una determinata matrice siano dovuti a una casualità, oppure a una classificazione corretta.

I valori di "Kappa" variano da 0 a 1, ovvero dalla classificazione identificabile come casuale, alla classificazione corretta non dettata dal caso. In questo specifico caso di studio la statistica "Kappa" è stata calcolata per valutare l'accuratezza della classificazione prodotta dall'algoritmo *Random Forest*, confrontandola con le verità a terra precedentemente individuate.

Tale fattore è stato calcolato con la formula (Lillesand *et al.*, 2015):

$$\hat{k} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \cdot x_{+i})}$$

Dove:

r = numero di righe della matrice di errore;

x_{ii} = numero di osservazioni sulla diagonale;

x_{i+} = osservazioni totali sulla riga i;

x_{+i} = osservazioni totali sulla colonna i;

N = numero delle osservazioni totali incluse nella matrice.

3.5 ANALISI IN LABORATORIO

3.5.1 DESCRIZIONE DEI SITI

Al fine di stimare il carbonio organico stoccato nella torba presente all'interno dell'area presa in esame, sono state individuate un gruppo di torbiere, in prossimità del paese Madonna di Campiglio (TN). Uno studio precedente, condotto da Spitale (2012) sullo stato di conservazione delle torbiere presenti nel Parco Naturale Adamello Brenta, aveva individuato un totale di 38 torbiere censite nell'Alta Val Rendena.

La prima fase di certificazione e identificazione dei siti è avvenuta mediante localizzazione da *Google Earth*. Del gruppo di torbiere note ne sono state infine selezionate quattro, tutte poste a pochi chilometri di distanza, insieme a un gruppo di ulteriori tre torbiere, presso il Lago delle Malghette che, per via delle condizioni meteorologiche instabili, non sono state campionate.

La torba campionata è stata successivamente analizzata in laboratorio per la determinazione della quantità di materia organica presente.

Di seguito una breve descrizione dei siti di campionamento.

SITO 1: MALGA DI RITORTO NORD

Classificata all'interno del gruppo delle torbiere ombrogene, che, nella definizione di habitat Natura 2000 corrispondono alle torbiere alte attive (Spitale, 2012). È attraversata da vari torrenti di piccole dimensioni e coperta da cumuli di sfagni (genere *Sphagnum*) (Fig. 3.15). Il paesaggio circostante si presenta semi-pianeggiante, con boschi, arbusti e molte rocce affioranti (Fig. 3.16). Il terreno, molto roccioso e coperto da uno strato di ghiaccio superficiale, non consente il campionamento completo della torba. Per questo sito, infatti, la profondità massima rilevata è stata di 23 cm.



Figura 3.15: sfagni in dettaglio.

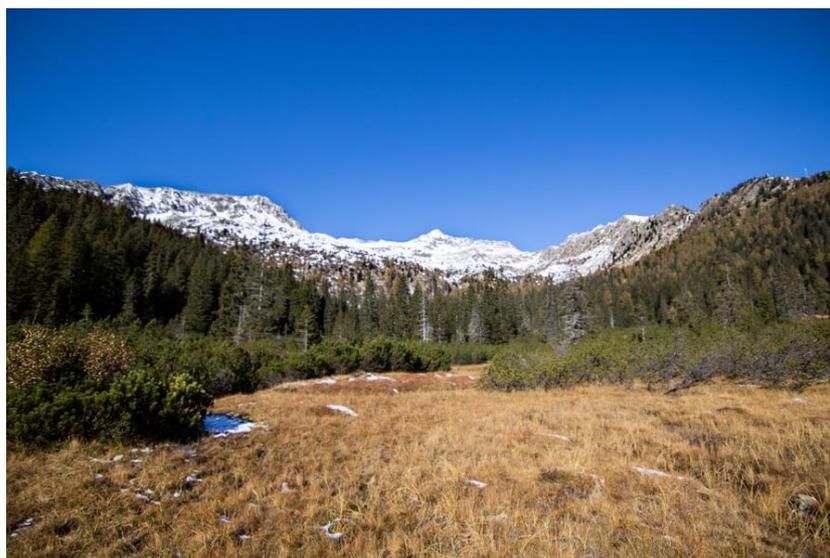


Figura 3.16: sito di campionamento "Rifugio Malga di Ritorto Nord".

SITO 2: MALGA DI RITORTO SUD

Torbiera alta attiva semi-pianeggiante, circondata da bosco (Fig. 3.17), posta a sud del Rifugio Malga di Ritorto. Le rocce sono in numero inferiore rispetto alla precedente e per tale motivo la profondità rilevata ha raggiunto i 90 cm.



Figura 3.17: sito di campionamento "Rifugio Malga di Ritorto Sud".

SITO 3: RIFUGIO LAGO NAMBINO

Torbiera alta attiva pianeggiante, raggiungibile dopo una breve salita che attraversa il bosco e posta sulle sponde del Lago Nambino. Il sito, per via di una minore esposizione al Sole, è per buona parte coperto da alcuni centimetri di neve (Fig. 3.18).

La profondità rilevata dell'orizzonte torboso è risultata superiore a 1 m.



Figura 3.18: sito di campionamento "Rifugio Lago Nambino".

SITO 4: GENZIANELLA

Torbiera che si presenta con morfologia differente rispetto alle precedenti. Il terreno torboso si sviluppa in un'area a pendenza piuttosto elevata (circa 20° di pendenza) e gli sfagni, in questo caso prevalentemente di colore rossastro, sono quasi completamente coperti da vegetazione erbacea del genere *Carex*, che nasconde la natura torbosa di tale area (Fig. 3.19). In bibliografia viene descritta come torbiera minerogena, classe che raggruppa torbiere che presentano valori di pH compresi tra 4.0 (minerogena povera) e 8.0 (minerogena ricca) (Spitale, 2012).

La profondità di campionamento ha superato il metro.

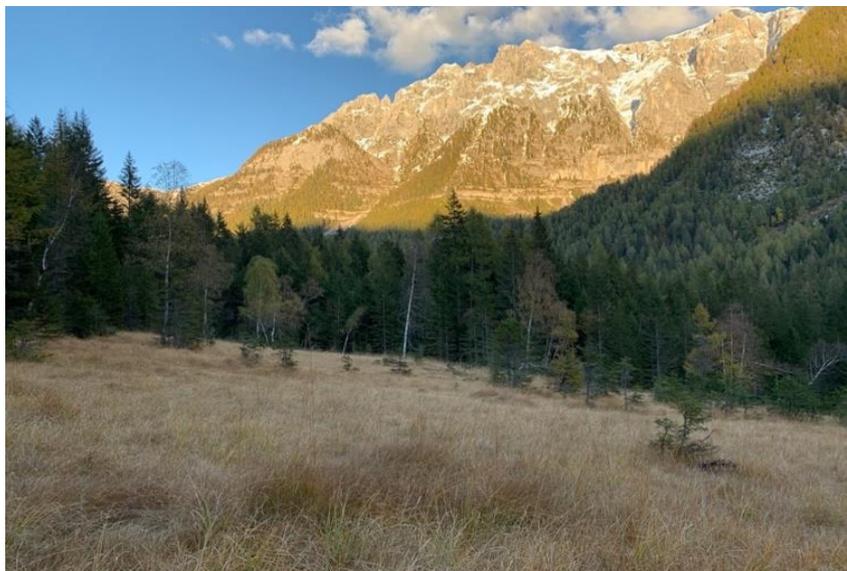


Figura 3.19: sito di campionamento "Genzianella".

Causa l'elevata densità della torba, la presenza di ghiaccio e di depositi litici a poca profondità dalla superficie, non è stato possibile raggiungere il fondo della torba in nessuna delle quattro torbiere campionate.

3.5.2 CAMPIONAMENTO

Per poter descrivere in maniera sufficientemente accurata la variabilità del territorio, sono state selezionate due/tre stazioni di campionamento per sito.

Il campionamento è stato effettuato mediante l'utilizzo di una sonda metallica per il carotaggio dei suoli, con diametro 2.5 cm e lunghezza 50 cm (Fig. 3.20 (a)). Tale strumento permette di misurare lo spessore dell'orizzonte torboso a intervalli di 50 cm. Quando l'altezza dell'area da campionare è maggiore della lunghezza dello strumento

è necessario ripetere la campionatura per gli orizzonti più profondi. Prima di inserire nuovamente la sonda all'interno del foro (Fig. 3.20 (b)) è necessario effettuare un'azione di pulizia dei resti del suolo appena campionato. Il campionamento viene effettuato girando la sonda in modo che perfori il suolo e, raggiunta la profondità massima, vengono eseguite due rotazioni, in modo da fissare il campione allo strumento.

Di ciascun sito sono state indicate le coordinate geografiche, il numero di stazioni e la profondità raggiunta dal campionamento (Tab. 3.4).

Alcuni rilievi non presentano i primi centimetri di suolo in quanto, a causa dell'elevata quantità di acqua, il loro recupero non è stato possibile.

I 17 campioni di torba risultanti sono stati infine conservati in buste di plastica, sottovuoto, recanti nome della stazione e profondità, con lo scopo di facilitarne il riconoscimento durante le analisi effettuate in laboratorio.



Figura 3.20: (a) esempio di carotaggio effettuato nel sito "Lago Nambino", corrispondente al campione 3C 0-50. (b): esempio di foro di campionamento nel sito "Genzianella".

Nome Sito di Campionamento	Coordinate UTM 32N		Nome Campione	Profondità [cm]
Malga Ritorto Nord	0639199 E	5120009 N	1A 0-22	0-22
			1B 0-20	0-20
Malga Ritorto Sud	06397776 E	5119576 N	2A 0-90	0-39
				50-90
			2B 8-66	8-50
				50-66
Lago Nambino	0639044 E	5122708 N	3A 50-100	50-100
			3B 50-143	50-87
				87-143
			3C 0-100	0-50
				50-100
Genzianella	0643191 E	5124860 N	4A 0-87	0-50
				50-87
			4B 0-180	0-50
				50-100
				100-150
				150-180

Tabella 3.4: Elenco e dettaglio dei campionamenti.

3.5.3 PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

Secondo diverse stime, le torbiere immagazzinano circa la stessa quantità di carbonio che viene stoccata dalla fitomassa mondiale, con valori che sono compresi tra 400 Pg e 600 Pg (Limpens *et al.*, 2008; Silvestri *et al.*, 2019a; 2019b; Boaga *et al.*, 2020).

Per la determinazione della quantità di materia organica contenuta all'interno della torba è necessario separare il carbonio organico (OC) da quello inorganico (IC) (Kristensen & Andersen, 1987), attraverso due principali metodi:

1. Analizzatore-CHN con *Different On Ignition* (DOI);
2. Analisi *Loss On Ignition* (LOI).

L'Analizzatore Elementare, o Analizzatore-CHN, brucia il campione a temperature superiori a 1000°C e tramite gascromatografia, rileva i prodotti della combustione, CO₂, N₂ e H₂O (Kristensen & Andersen, 1987). Questo tipo di analisi presenta molteplici vantaggi, come la velocità con la quale essa viene eseguita (meno di 10 min. per campione), la piccola quantità di campione richiesto e la determinazione simultanea di carbonio (C) e azoto (N) (Kristensen & Andersen, 1987). Tuttavia, per avere informazioni sulla quantità di carbonio organico e inorganico contenuti all'interno del suolo analizzato, risulta necessario applicare il calcolo della *Different On Ignition*. In questo caso, si quantifica il contenuto di carbonio organico (OC) mediante differenza

tra il carbonio totale (TC), ottenuto tramite analisi-CHN del campione secco, e il carbonio inorganico (IC), risultato della combustione a 500°C in stufa a muffola per 16 ore (Kristensen & Andersen, 1987).

La procedura della *Loss on Ignition* determina sempre la quantità di cenere, ovvero la frazione inorganica, contenuta nei campioni, attraverso combustione in stufa a muffola e sottraendo il peso dell'incombusto al peso dei campioni originali, si determina la quantità di materia organica (Silvestri *et al.*, 2019a).

I 17 campioni raccolti nelle nove stazioni di campionamento sono stati analizzati nella settimana dal 20 al 28 Ottobre 2020, con lo scopo di determinare la densità apparente secca (*dry Bulk Density* - BD) e il contenuto di materia organica nel suolo (*Soil Organic Matter content* - SOM).

La densità apparente secca è stata calcolata dividendo la massa del campione secco (g) per il suo volume (cm³), mentre il contenuto di materia organica nel suolo è stato ottenuto moltiplicando, per ciascun campione, il valore della BD (g/cm³) e il contenuto di carbonio organico (Silvestri *et al.*, 2019a), attenendosi alla procedura sotto descritta, che segue la *Loss On Ignition*.

Ciascun volume di campione, calcolato in base al diametro e alla lunghezza della sonda utilizzata nel campionamento, è stato trasferito all'interno di una vaschetta di alluminio (a peso noto - M_c), è stato successivamente pesato a umido e scaldato a 105°C per 24 ore (Fig. 3.21 (a)). Dato l'elevato contenuto di acqua, sono state eseguite due ulteriori fasi di riscaldamento, di un'ora ciascuna, per consentirne la completa evaporazione, ovvero sino a quando la variazione di peso tra i campioni prima e dopo, non fosse stata minima. Il valore ottenuto dall'ultima pesata indica la massa totale (M_t) (Fig. 3.21 (b)), ovvero il peso del campione (M_{samp}), aggiunto a quello della vaschetta (M_c) (Tab. 3.5).

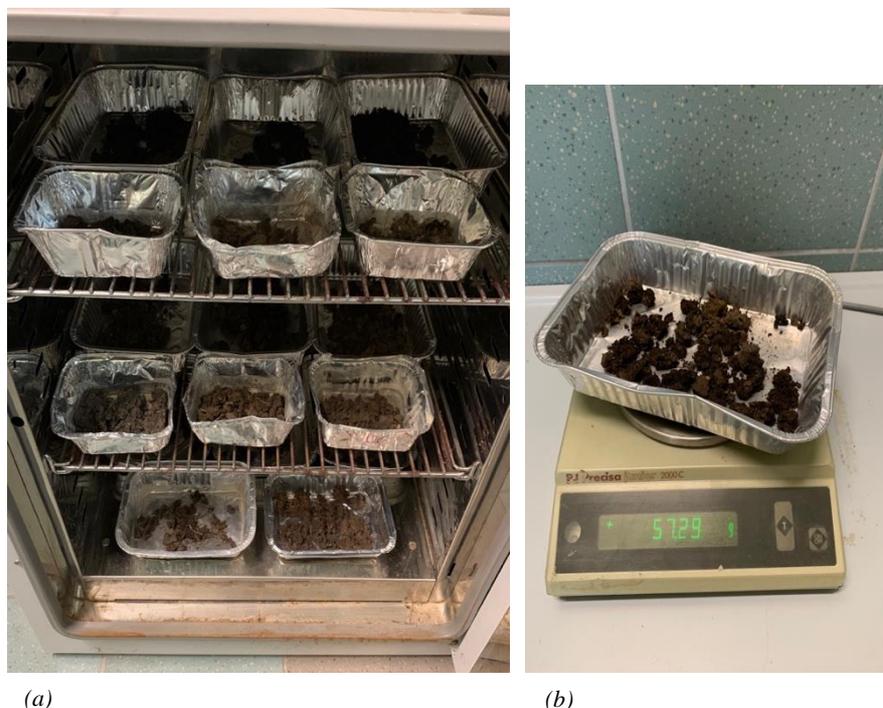


Figura 3.21: (a) fase di riscaldamento in stufa dei campioni. (b) peso del campione secco (M_t)

Nome campione (sample)	Peso contenitore (M_c) [g]	Peso totale (M_t) [g]	Peso campione ($M_t - M_c$) [g]
1A 0-22cm	6.53	18.47	11.94
1B 0-20cm	6.05	15.79	9.74
2A 0-39cm	15.84	32.82	16.98
2A 50-90cm	16.08	57.26	41.18
2B 8-50cm	6.88	25.75	18.87
2B 50-66cm	9.02	16.85	7.83
3A 50-100cm	13.17	47.87	34.70
3B 50-87cm	6.16	32.61	26.45
3B 87-137-143cm	6.11	36.60	30.49
3C 0-50cm	15.92	54.48	38.56
3C 50-100cm	15.94	57.19	41.25
4A 0-50cm	15.91	37.28	21.37
4A 50-87cm	6.13	63.00	56.87
4B 0-50cm	15.84	33.47	17.63
4B 50-100cm	13.24	29.53	16.29
4B 100-150cm	13.19	30.50	17.31
4B 150-180cm	6.17	27.45	21.28

Tabella 3.5: valori relativi a ciascun peso del campione a secco.

Una volta secchi, i campioni sono stati macinati (Fig. 3.22), ottenendo così un prodotto finale omogeneo e fine, e racchiusi all'interno di sacchetti di plastica contrassegnati con nome identificativo della stazione di campionamento e la data di trattamento (Fig. 3.22). Attraverso l'uso della bilancia analitica, che consente un elevato grado di accuratezza (sino al terzo ordine decimale), sono stati pesati circa 10 g di campione (M_{samp}) e

conseguentemente trasferiti all'interno di crogioli di ceramica o ceramica di allumina, materiali che garantiscono una buona resistenza alle temperature elevate. Questi ultimi sono stati previamente lavati con acqua distillata e pesati (M_{cru}). I campioni analizzati sono stati poi lasciati all'interno dell'essiccatore per circa 30 minuti.



Figura 3.22: fase di macinatura del suolo, in particolare del campione 4A 50-87.

I crogioli e il loro contenuto sono stati posizionati all'interno del forno a muffola (Fig. 3.23 (a)), strumento che consente di ottenere il contenuto di ceneri del campione. Infatti, quando si scalda un materiale a temperature oltre i 400°C, la materia organica in esso contenuto si degrada (Nelson & Sommers, 1996) e il residuo inorganico prende il nome di cenere. Al fine di garantire una totale combustione della materia organica, i campioni sono stati portati a temperatura di 450°C, eseguendo una rampa termica, ovvero innalzando di 100°C ogni ora. Una volta raggiunto il grado di calore desiderato, si mantiene la temperatura costante per 8 ore.

Dopo aver lasciato raffreddare i campioni di cenere residua (Fig. 3.23 (b)) all'interno dell'essiccatore, al fine di evitare contaminazioni derivanti dall'ambiente esterno e il conseguente aumento dell'umidità, ne è stato pesato il loro contenuto (M_{ash}) (Fig. 3.23 (c)) (Tab.3.6).

La differenza tra il peso dei campioni pre-muffola e post-muffola permette di stabilire il contenuto organico totale presente.

Nome campione (sample)	Profondità [cm]	Peso crogiolo [g]	Peso campione [g]	Peso cenere+crogiolo [g]	Peso cenere [g]	Peso materia organica [g]	% cenere
1A 0-22cm	22	55.2875	10.0124	60.7898	5.5023	4.5101	54.9549
1B 0-20cm	20	31.0144	8.5888	34.9179	3.9035	4.6853	45.4487
2A 0-39cm	39	55.2878	10.0183	56.5236	1.2358	8.7825	12.3354
2A 50-90cm	40	54.6753	10.0077	61.8853	7.2100	2.7977	72.0445
2B 8-50cm	42	57.5137	10.0151	58.7403	1.2266	8.7885	12.2475
2B 50-66cm	16	55.2879	7.5402	56.7753	1.4874	6.0528	19.7263
3A 50-100cm	50	57.5131	10.0416	59.8877	2.3746	7.6670	23.6476
3B 50-87cm	37	55.0942	10.0890	61.7245	6.6303	3.4587	65.7181
3B 87-137-143cm	56	54.6751	10.0246	59.9375	5.2624	4.7622	52.4949
3C 0-50cm	50	56.0691	10.0023	62.5521	6.4830	3.5193	64.8151
3C 50-100cm	50	56.0682	10.0387	60.0374	3.9692	6.0695	39.5390
4A 0-50cm	50	56.0690	10.0724	57.8797	1.8107	8.2617	17.9768
4A 50-87cm	37	66.7673	10.0944	74.5339	7.7666	2.3278	76.9397
4B 0-50cm	50	55.0949	10.0214	56.2427	1.1478	8.8736	11.4535
4B 50-100cm	50	54.6753	10.0106	55.6118	0.9365	9.0741	9.3551
4B 100-150cm	50	55.0947	10.0186	56.1346	1.0399	8.9787	10.3797
4B 150-180cm	30	50.8483	10.0048	55.2498	4.4015	5.6033	43.9939

Tabella 3.6: risultati delle pesature di ciascun campione pre e post-muffola.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.23: (a) posizionamento dei campioni all'interno del forno a muffola; (b) campioni di cenere residua; (c) fase di pesatura della cenere (M_{ash}).

4. RISULTATI

4.1 DATABASE DELLE TORBIERE

In figura 4.1 si mostra la distribuzione delle torbiere “certe” in tutto il territorio preso in esame, digitalizzate a partire da diverse banche dati.

Delle 71 torbiere totali, la cui presenza all’interno del territorio è stata certificata dal riconoscimento tramite immagini satellitari “*Google Earth*”, 38 sono situate all’interno della Provincia Autonoma di Bolzano, mentre le restanti 33 nell’area della Provincia Autonoma di Trento.

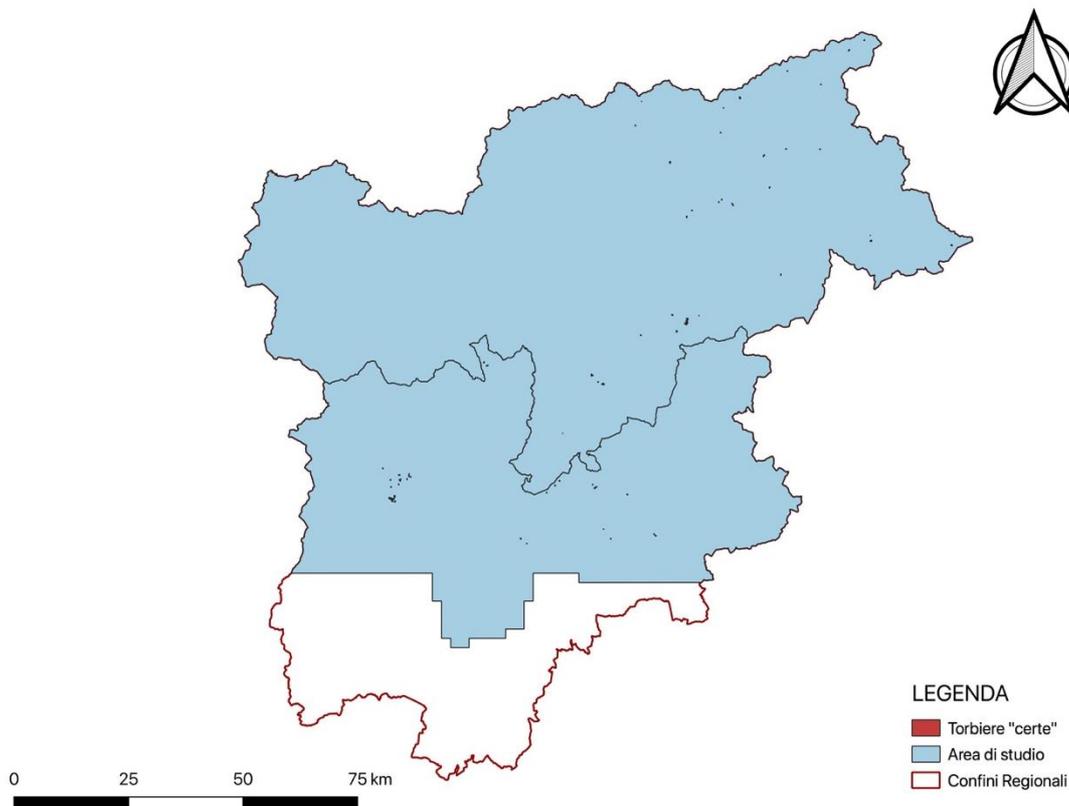


Figura 4.1: distribuzione delle torbiere “certe” all’interno dell’area di studio. – elaborazione QGIS.

4.2 DTM, PENDENZE E STATISTICA DELLE TORBIERE

In figura 4.2 viene illustrato il Modello Digitale del Terreno della Provincia di Bolzano e dell’area inclusa all’interno della Provincia di Trento. A partire dal DTM è stata successivamente estratta l’informazione della pendenza per tutta l’area presa in esame (Fig. 4.3).

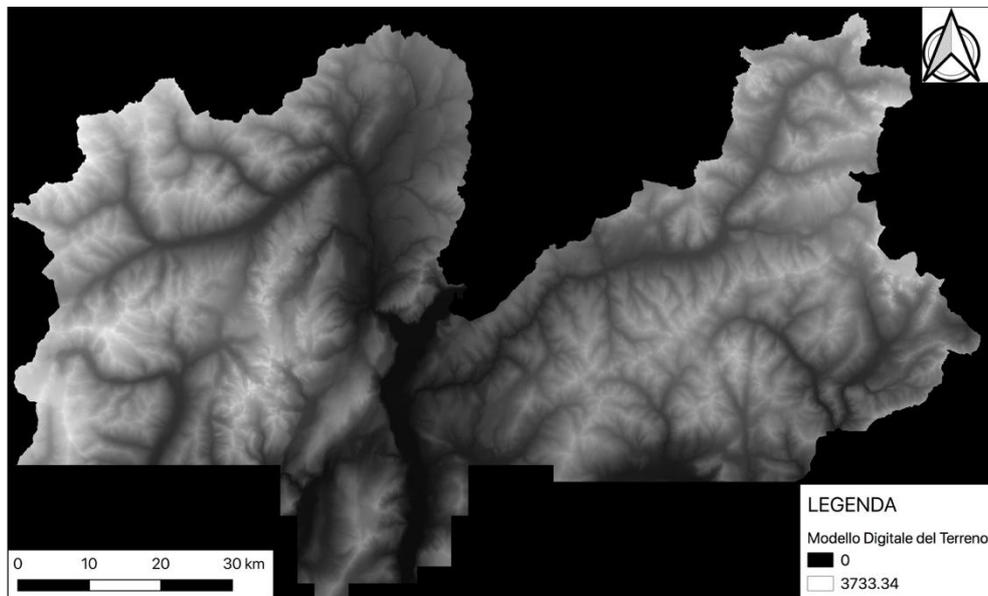
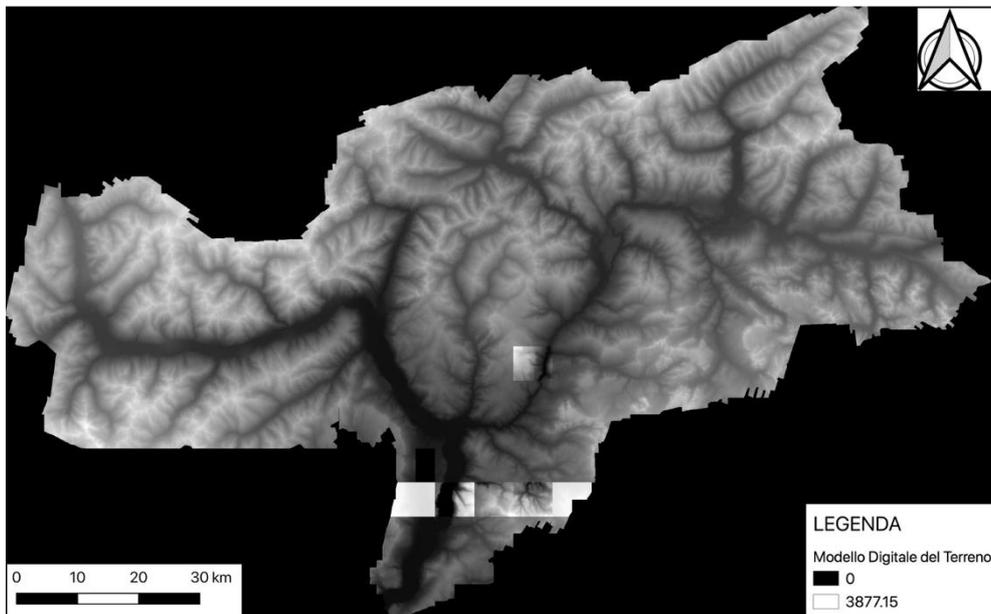


Figura 4.2: Modello Digitale del Terreno della Provincia Autonoma di Bolzano (sopra) e Modello Digitale del Terreno dell'area inclusa all'interno della Provincia Autonoma di Trento (sotto).

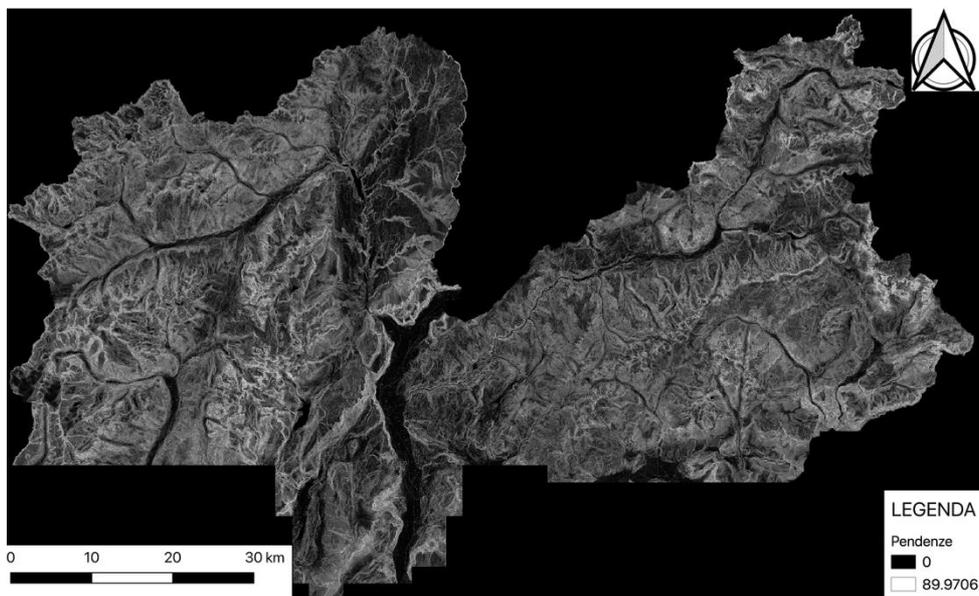
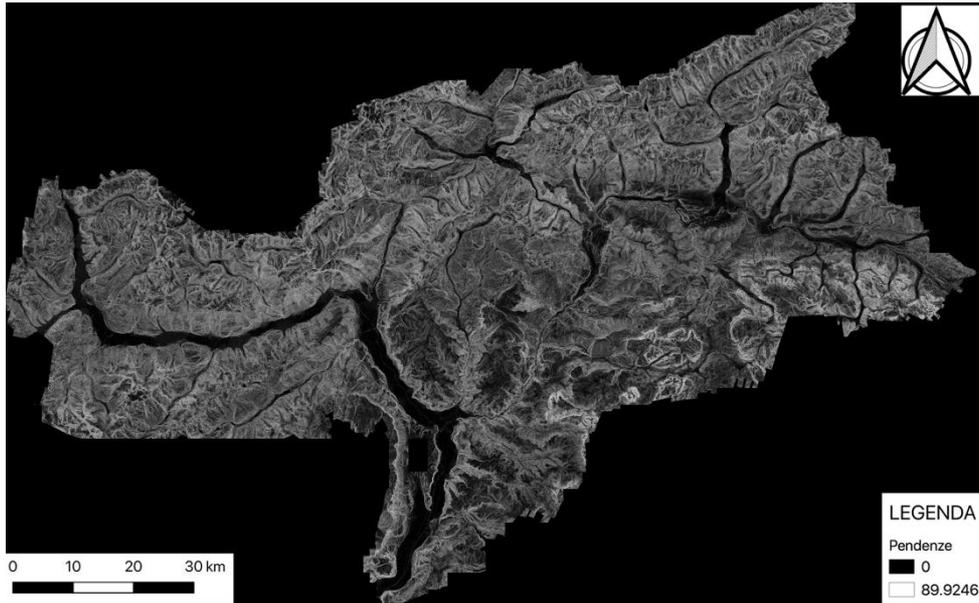


Figura 4.3: Pendenze ricavate a partire dal DTM per la Provincia Autonoma di Bolzano (sopra) e l'area inclusa all'interno della Provincia Autonoma di Trento (sotto).

A partire dalla pendenza, è stata calcolata la statistica per ciascuna torbiera, o gruppo di torbiere (raggruppate) incluse all'interno del Modello Digitale del Terreno (Tab. 4.1). Sono stati calcolati i valori di media della pendenza, mediana, deviazione standard, varianza, minimo, massimo, deviazione mediana assoluta e conteggio dei pixel.

Prov	Zone ID	Mean	Median	Standard deviation	Variance	Minimum	Maximum	Median absolute deviation	Pixel count
BZ	Merge_1	7.629139	3.137927	8.219423	67.55891	0.0405659	42.85639	2.516439915	5963
BZ	Merge_2	6.764262	4.822799	6.1394796	37.69321	0	44.668865	3.045848012	28800
BZ	Merge_3	8.101698	5.981712	6.944159	48.22134	0.0027976	36.84042	4.204837859	11560
BZ	Merge_4	14.0362	13.13557	5.9804654	35.76597	0.201779	39.731056	3.438429832	16848
BZ	Merge_5	9.367105	5.23402	9.641427	92.95712	0	35.40828	4.947263479	2075
BZ	Merge_6	6.480849	5.269314	5.5969553	31.32591	0.0027976	22.919582	4.417894751	780
BZ	Merge_7	8.519547	3.63392	9.625655	92.65324	0.0376385	42.506554	2.999284446	3706
BZ	dtm_02134	16.18396	15.78629	12.554024	157.6035	0.0395647	55.52239	11.96814752	22230
BZ	dtm_03124	2.454385	0.928717	3.940308	15.52603	0.0903493	25.080973	0.544129387	340
BZ	dtm_07142	2.574707	0.975134	3.0603313	9.365627	0	17.585077	0.773972601	4092
BZ	dtm_09191	6.826658	5.923434	3.5858717	12.85848	0.0395647	19.851269	2.164334178	6968
BZ	dtm_10254	12.13249	6.847199	12.97227	168.2798	0.0559529	69.48663	3.038512945	15120
BZ	dtm_11164	4.141381	2.520595	4.579004	20.96728	0	38.554672	2.067419469	10792
BZ	dtm_12194	2.677141	1.334389	4.10169	16.82386	0	31.8974	0.929994151	11716
BZ	dtm_13151	3.409636	2.318678	3.2547815	10.5936	0.0013988	30.984821	1.225021482	16968
BZ	dtm_14202	3.16461	1.857089	4.0499644	16.40221	0.0027976	33.64814	0.923696876	4697
BZ	dtm_14232	17.27506	16.88355	5.627528	31.66907	2.4632087	33.527042	3.554324627	1450
BZ	dtm_15142	0.819873	0.532823	1.432993	2.053469	0	22.834942	0.275903299	5576
BZ	dtm_16142	6.994065	1.305036	8.709627	75.85761	0.0395647	29.428307	1.150406964	546
BZ	dtm_17192	1.89934	1.595916	1.5649664	2.44912	0.0395647	22.699163	0.530577898	3465
BZ	dtm_18212	16.63888	14.7828	11.163119	124.6152	0.0811075	48.338715	8.843191385	15180
BZ	dtm_18224	7.976459	2.386054	11.274488	127.1141	0.0911276	49.51645	1.081037581	4902
TN	g1_nord	16.56597	16.02218	12.331389	152.0632	0.0098912	64.59965	11.79140663	138024
TN	g1_sud	11.10497	7.026588	10.101775	102.0459	0.0586213	67.02859	4.451023579	44082
TN	g3_g4_nord	9.912935	4.226378	11.358533	129.0163	0	48.21735	2.707697153	10302
TN	g5_g15	9.912935	4.226378	11.358533	129.0163	0	48.21735	2.707697153	10302
TN	g6_ne	8.457624	7.635376	5.59949	31.35429	0	41.12646	3.490250587	113155
TN	g7_g8	14.25499	11.93198	10.456467	109.3377	0.0371742	59.971695	7.871149302	22372
Media		8.438459	6.009351	7.3294542	66.11387	0.1191238	40.1088655	3.487853324	19000.3929
Intervallo		-6.22045	23.09737						

Tabella 4.1: statistica della pendenza ricavata dalle 71 torbiere digitalizzate.

4.3 APPLICAZIONE DELLA MASCHERA ALLE IMMAGINI SENTINEL-2

La maschera delle pendenze è stata successivamente sovrapposta alle immagini Sentinel-2 (Fig. 4.4), tramite l'impiego del software ENVI. Grazie all'applicazione di questa maschera, nella fase successiva della classificazione sono state escluse a priori tutte le aree con pendenza maggiore di 25° , che presentano quindi una bassa probabilità, in termini di pendenza, di ospitare le aree di torba.



Figura 4.4: applicazione della maschera delle pendenze all'immagine satellitare Sentinel-2. – elaborazione ENVI.

4.4 SELEZIONE RITAGLIO IMMAGINE SATELLITARE

Al fine di velocizzare e semplificare il processo di classificazione, è stata selezionata una porzione di immagine satellitare Sentinel-2 che cadeva a cavallo del confine tra le province di Trento e Bolzano. La scelta è dettata dal fatto che questa immagine è considerata rappresentativa del territorio preso in esame e comprende un numero sufficientemente elevato di aree di torba “certe”, precisamente 24.

Di seguito sono riportate le firme spettrali di 30 pixel selezionati all'interno di ciascuna classe di copertura del suolo, a partire dalle verità a terra, utilizzate per avviare il processo di classificazione.

I valori di riflettanza relativi alle bande dello spettro elettromagnetico considerate (Fig. 4.5) sono tutti compresi tra 0% e 80%.

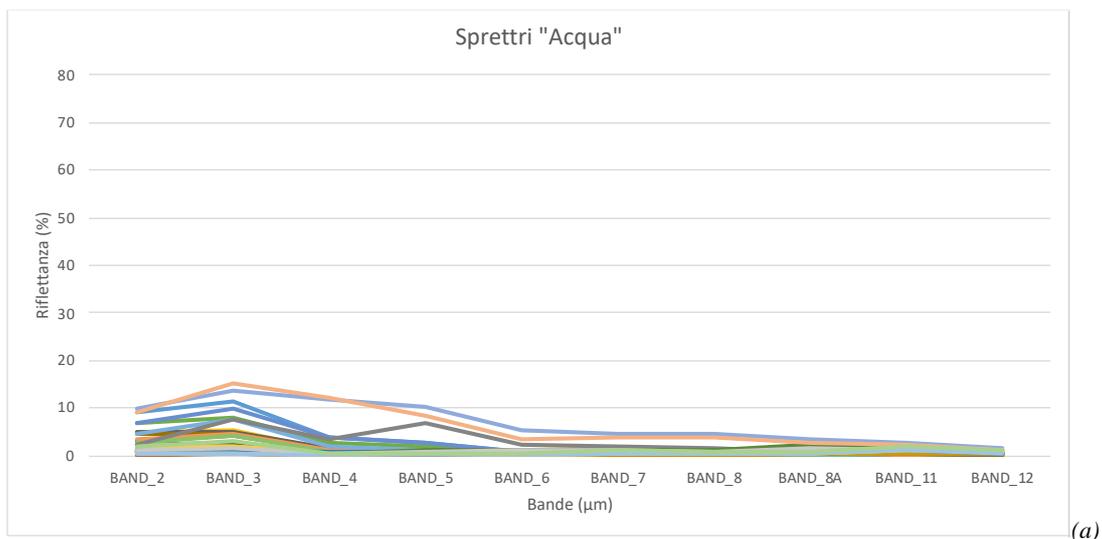
La firma spettrale dei pixel classificati come “acqua” non presenta similarità con nessuna delle altre classi, motivo per cui la maggior parte delle classificazioni errate per questa categoria rientra all'interno della classe “maschera”. La maggior parte dei pixel inclusi in questa classe presenta un alto tasso di assorbimento, con conseguente valore di riflettanza prossimo a zero a partire dalla banda 6, corrispondente alle lunghezze d'onda dello spettro dell'infrarosso (Fig. 4.6 (a)).

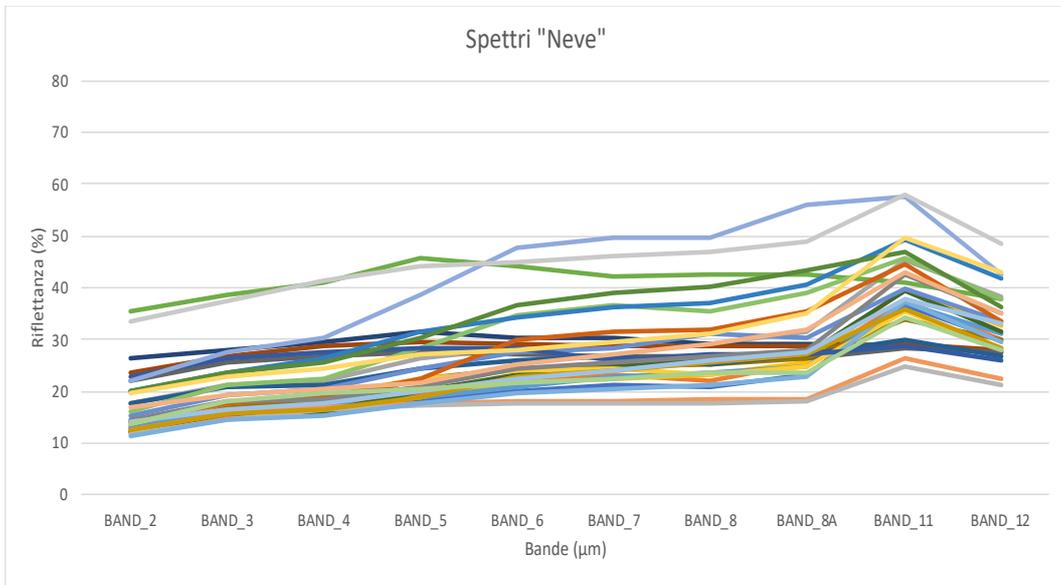
Le firme spettrali delle classi “neve”, “urbano”, “suolo” e “rocce” presentano un andamento crescente di riflettanza, con valori massimi nella banda 11 (1.610 μm) (Fig. 4.6 (b); (c); (d); (e)). Gli spettri della classe “bosco”, “seminativo 4” e “seminativo1” mostrano massimo assorbimento nelle bande del visibile e la riflettanza tende a crescere dalla banda 5 alla banda 8A, per poi scendere a lunghezze d'onda maggiori di 1 μm (Fig. 4.6 (f); (g); (h)). Un andamento simile è quello delle classi “seminativo 2”, “seminativo 3” e “prato” in cui, a parte qualche eccezione, la riflettanza massima è posta nell'intervallo compreso tra 45% e 55% (Fig. 4.6 (i); (l); (m)).

Le firme spettrali della classe “torbiera”, ad eccezione di una serie, che presenta assorbimento massimo nella banda 8A, mostrano andamento simile soprattutto alla classe “bosco”, con valori di riflettanza compresi tra 0% e 45% (Fig. 4.6 (n)).

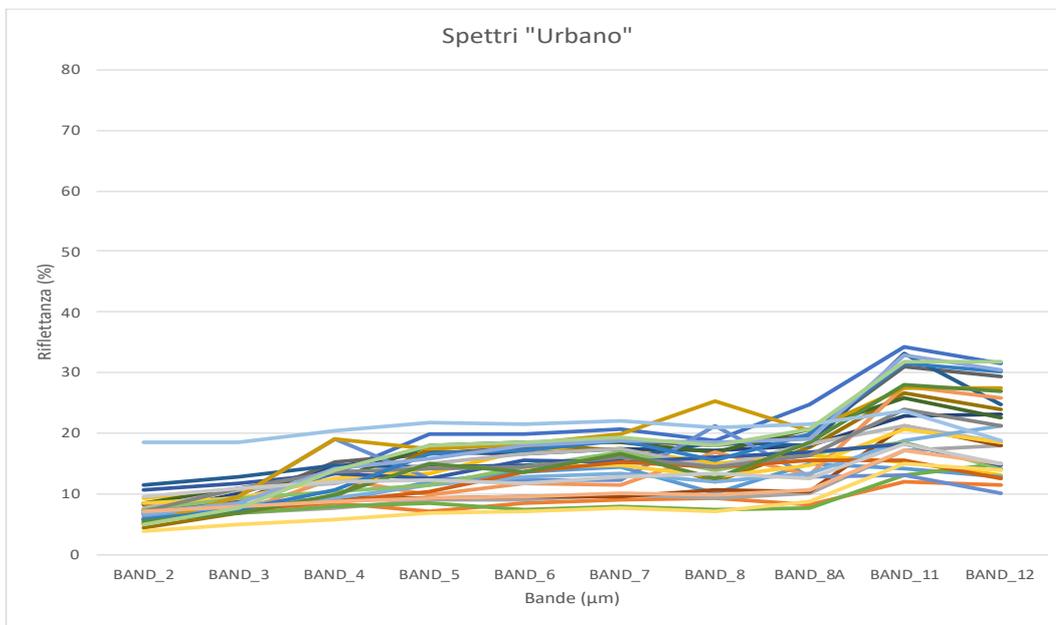
SENTINEL-2 BANDE	LUNGHEZZA D'ONDA CENTRALE [μm]
2	0.490
3	0.560
4	0.665
5	0.705
6	0.740
7	0.783
8	0.842
8A	0.865
11	1.610
12	2.190

Figura 4.5: bande dello spettro elettromagnetico considerate nella classificazione Random Forest.

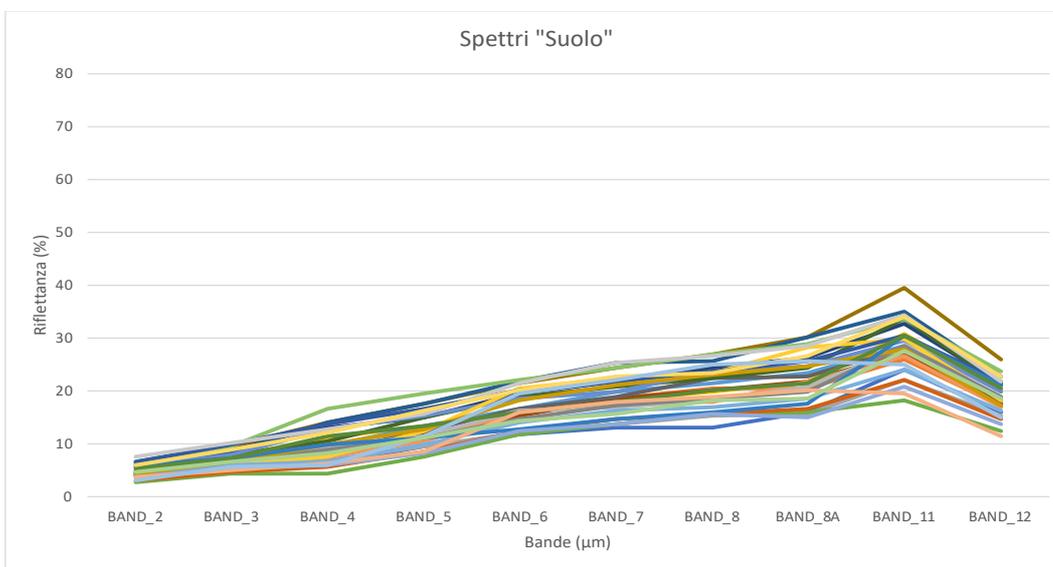




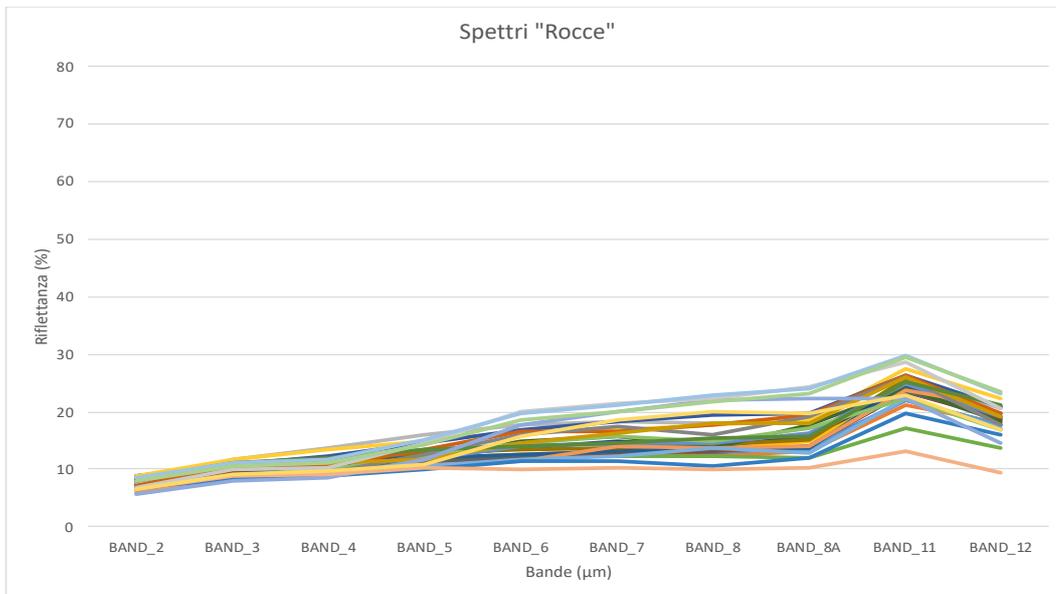
(b)



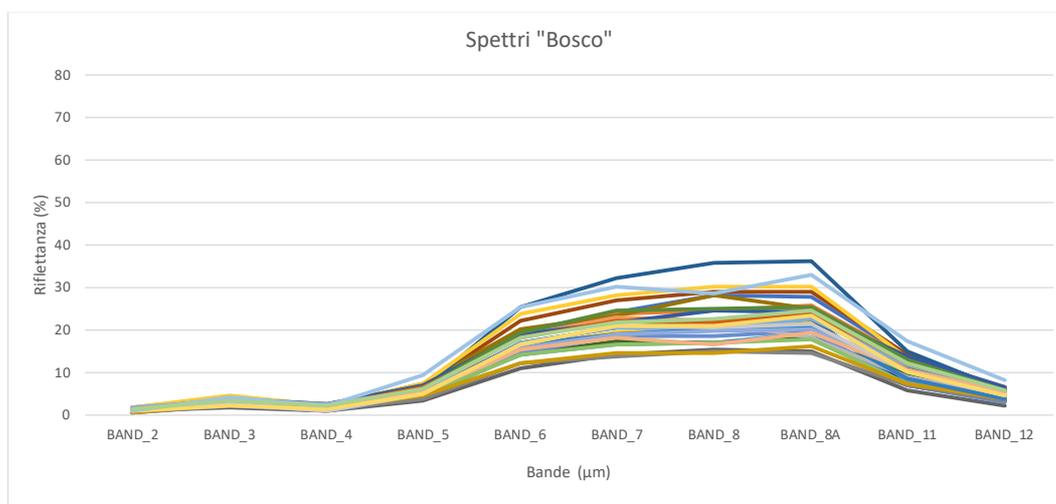
(c)



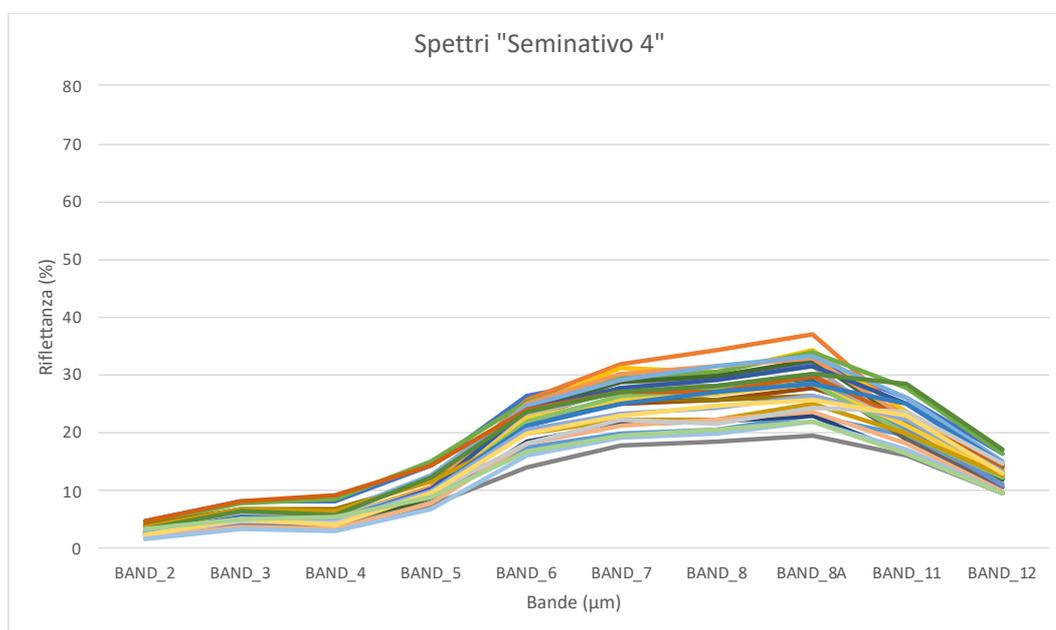
(d)



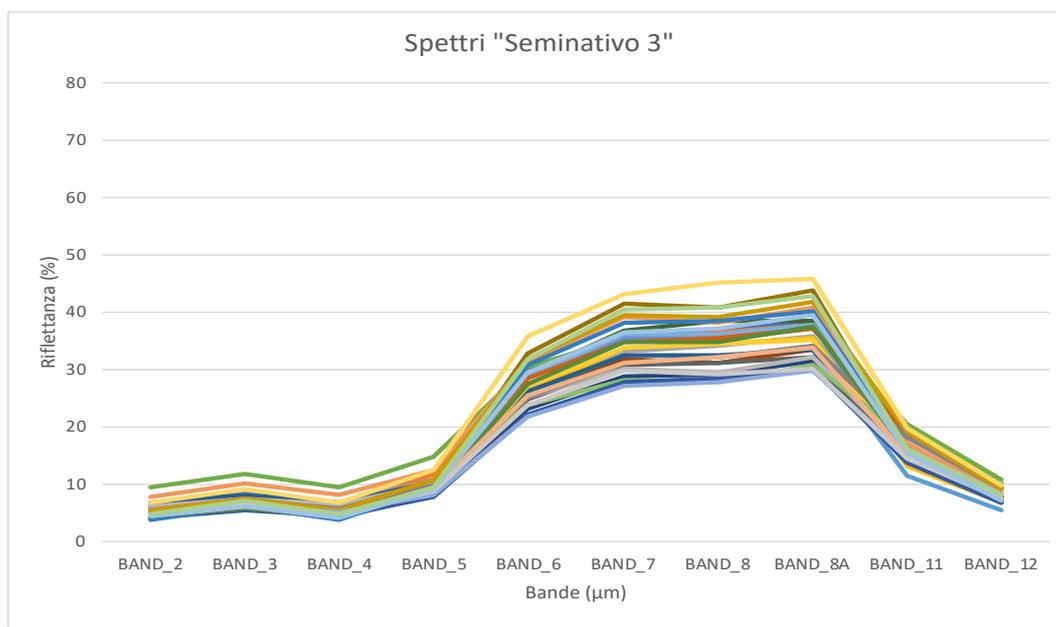
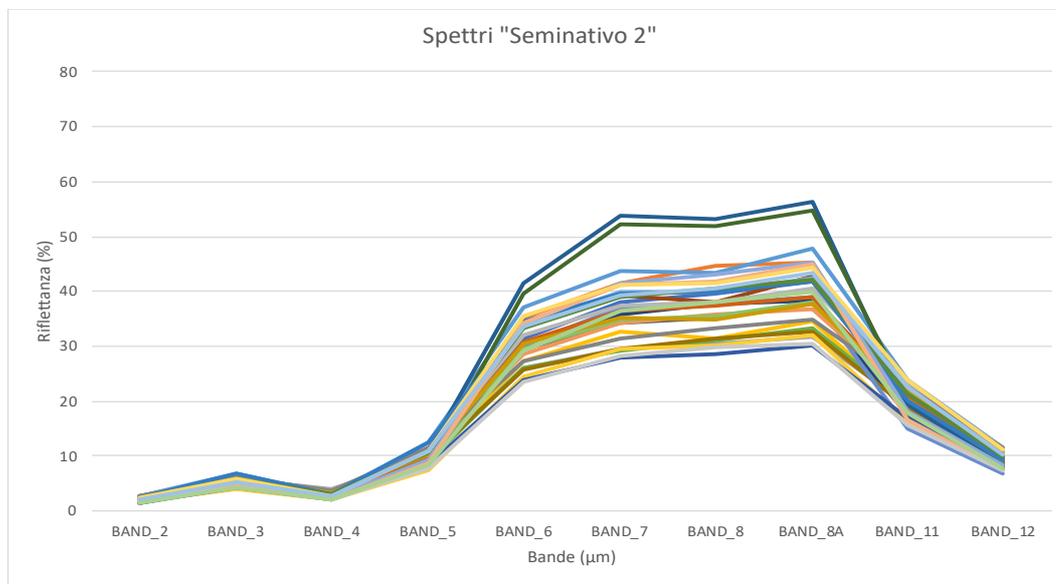
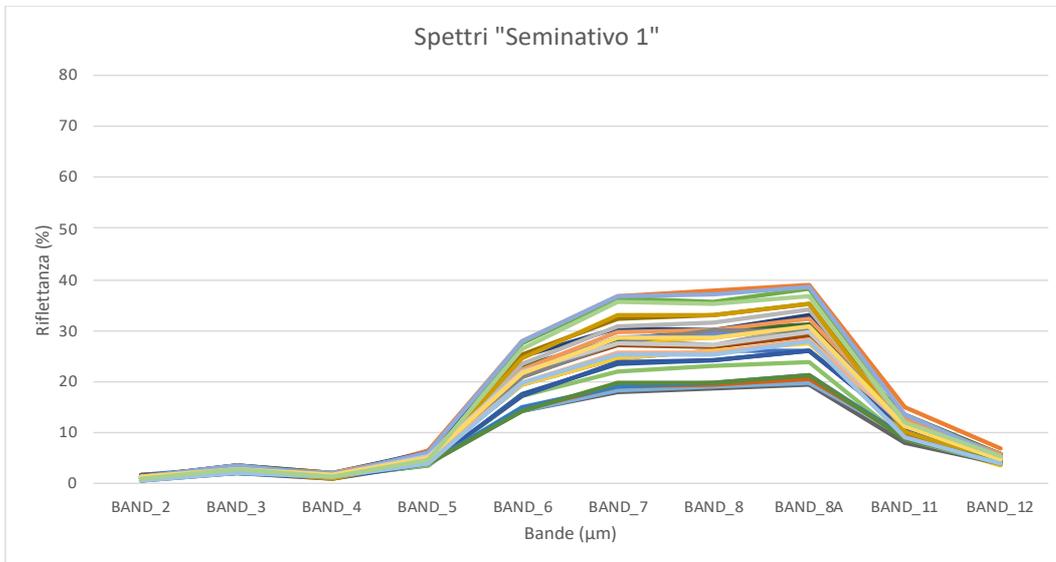
(e)



(f)



(g)



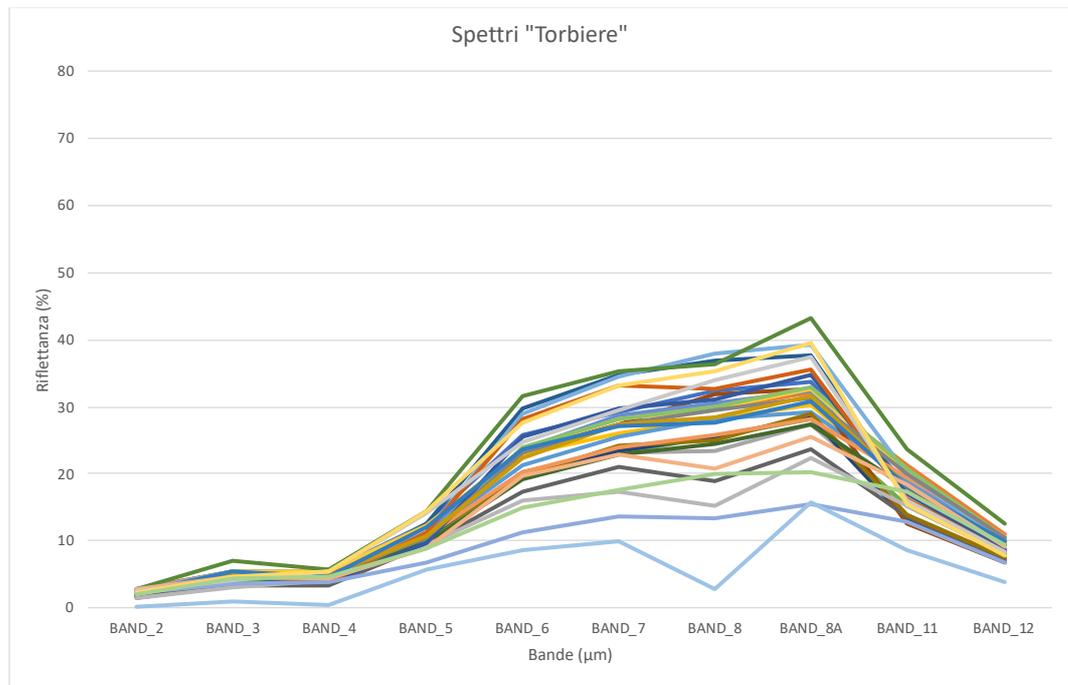
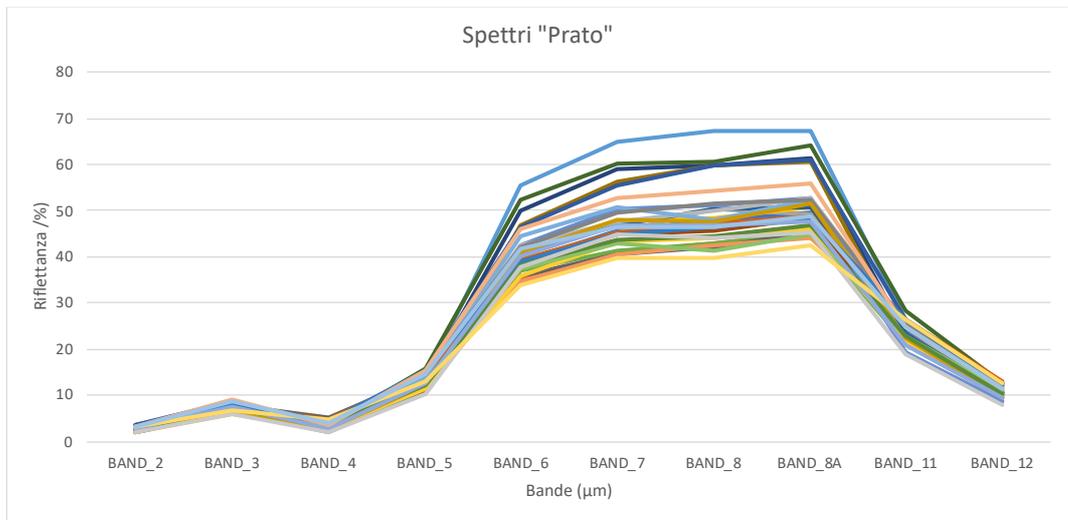


Figura 4.6: (a); (b); (c); (d); (e); (f); (g); (h); (i); (l); (m); (n): firme spettrali delle varie classi di copertura del suolo considerate.

4.5 CLASSIFICAZIONE SULLE IMMAGINI CON 10, 11 E 12 BANDE

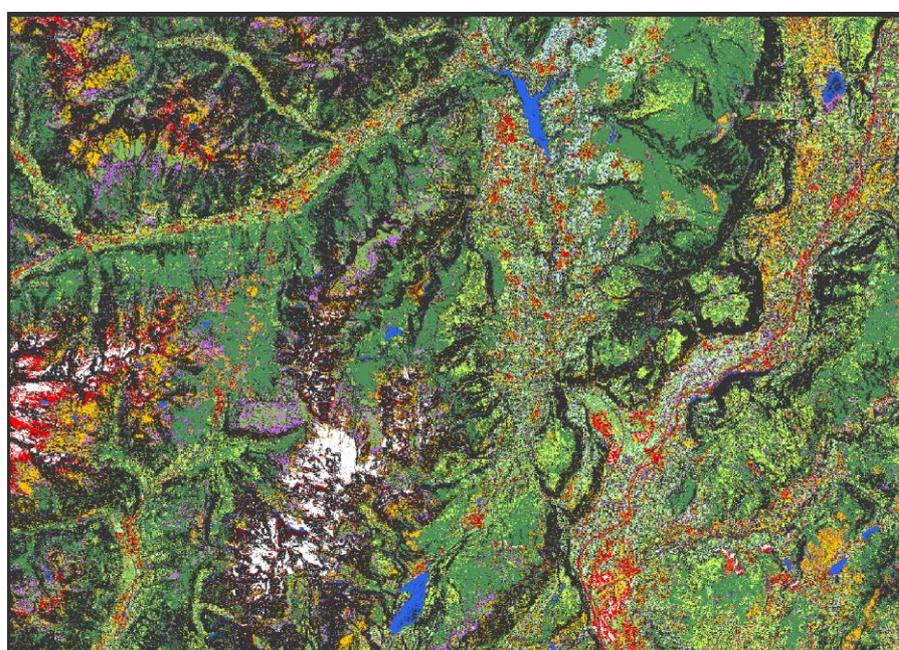
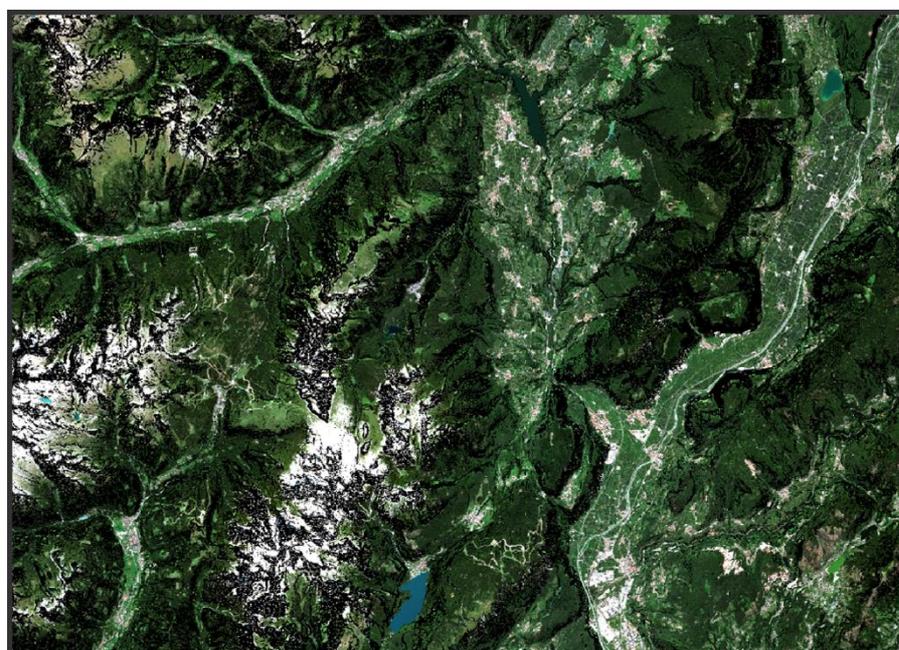
A partire dalla porzione di immagine satellitare selezionata, sono state effettuate tre prove di classificazione: (i) a 10 bande, ovvero valutando esclusivamente le risposte spettrali delle diverse classi di copertura del suolo (bande Sentinel-2 selezionate), (ii) a 11 e (iii) a 12 bande. Nello specifico, per la classificazione a 11 bande è stata aggiunta una banda sintetica ottenuta dalla pendenza delle superfici e derivante dal DTM. Infine, nella combinazione a 12 bande, è stata aggiunta anche una banda sintetica della quota del suolo (il DTM vero e proprio).

Per tutte le classificazioni sono stati inseriti un numero di *training samples* pari a 6000 (uguali per le tre classificazioni) e 600 alberi, utilizzati per creare la foresta *Random Forest*.

Il risultato della prima classificazione è visibile in figura 4.7, nella quale sono riportate sia l'immagine a falsi colori naturali (sopra) che l'immagine classificata (sotto). In dettaglio si può osservare che le classi "neve" e "acqua" di lago sono stimate in modo soddisfacente, mentre risulta evidente la sovrastima di "torbiere", con percentuale di frequenza dei pixel all'interno della classe del 10%, e "urbano", con frequenza dei pixel del 3.6%. La classe "urbano" è presente soprattutto nelle aree montuose a nord-ovest e a ovest, in cui predominano affioramenti rocciosi e neve e, ad est, nelle zone coperte da acqua fluviale. Le classi "bosco" e "prato" vengono spesso confuse con le aree di torba o di seminativo, ma, in generale, la classificazione per queste categorie può considerarsi abbastanza performante.

Il "suolo nudo" viene talvolta confuso con la classe "seminativo 4", mentre le "rocce", maggiormente classificate in modo errato come "urbano", "suolo" o "seminativo 4", vengono stimate correttamente solo in cima ai rilievi montuosi.

Le aree coperte da seminativo risultano, infine, essere discriminate piuttosto bene, ad eccezione di alcune zone confuse con le aree di torba, specie nella zona est.



Label	Colour	Value	Frequency
no data		-1	0.000%
Acqua	Blue	0	1.429%
Bosco	Green	1	33.674%
Maschera	Black	2	0.000%
Neve	White	3	3.991%
Prato	Light Green	4	7.058%
Rocce	Grey	5	1.187%
Seminativo1	Light Green	6	15.468%
Seminativo2	Light Green	7	9.576%
Seminativo3	Light Blue	8	1.858%
Seminativo4	Yellow	9	10.477%
Suolo	Brown	10	1.462%
Torbiera	Purple	11	10.257%
Urbano	Red	12	3.562%

Figura 4.7: risultato della classificazione Random Forest ottenuta utilizzando 10 bande dello spettro elettromagnetico, con relativa legenda.

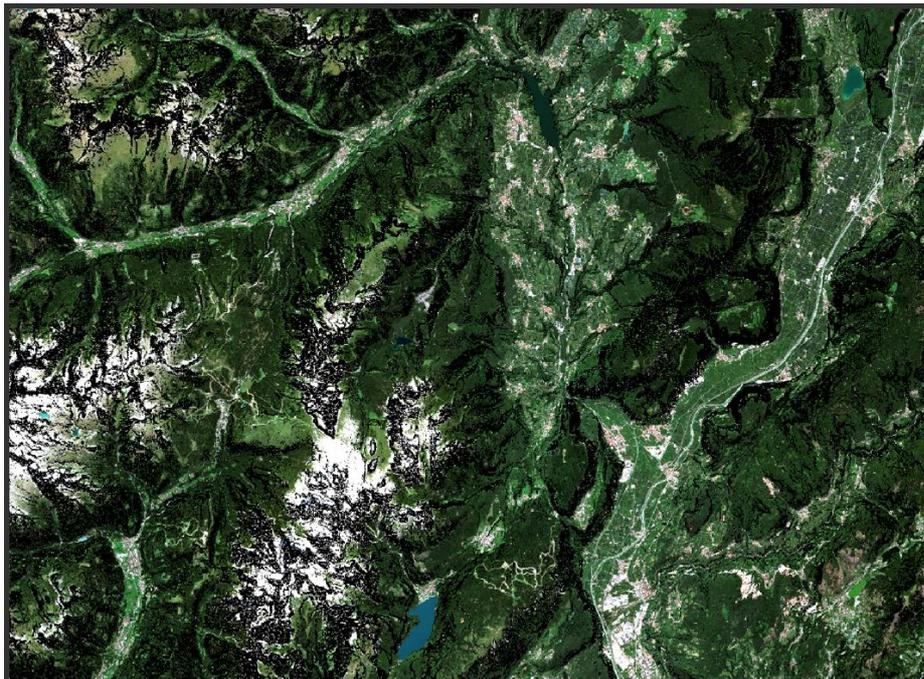
Ai fini di ridurre la sovraclassificazione delle aree di torba, i dati di input sono stati addestrati considerando la banda aggiuntiva della pendenza (Fig. 4.8).

I risultati mostrano molta similarità con la classificazione effettuata in precedenza, attraverso l'uso delle sole 10 bande dello spettro elettromagnetico, specie per le classi di "rocce" e "neve".

In questo caso le aree di torba, rappresentate dalla frequenza percentuale di 8.4% dei pixel totali, costituiscono la stima più bassa ottenuta, mentre la classe "urbano" risulta ancora confusa con la superficie delle aree montuose e le zone coperte da neve. Elevato resta anche l'errore di classificazione del "suolo", indistinto da "seminativo 4", specie nella zona montana e a sud est, mentre "seminativo 1, 2 e 3", esclusa la classificazione errata nella classe "torbiere", sono discriminati piuttosto bene.

L'aggiunta della banda della pendenza favorisce la discriminazione tra le classi "bosco" e "prato" con "torbiere" e "seminativo 1, 2".

L'acqua risulta essere fortemente sottostimata, spesso inclusa nella classe definita "maschera", ovvero la categoria in cui sono state raggruppate tutte le aree con pendenza maggiore di 25°, escluse a priori dalla classificazione.



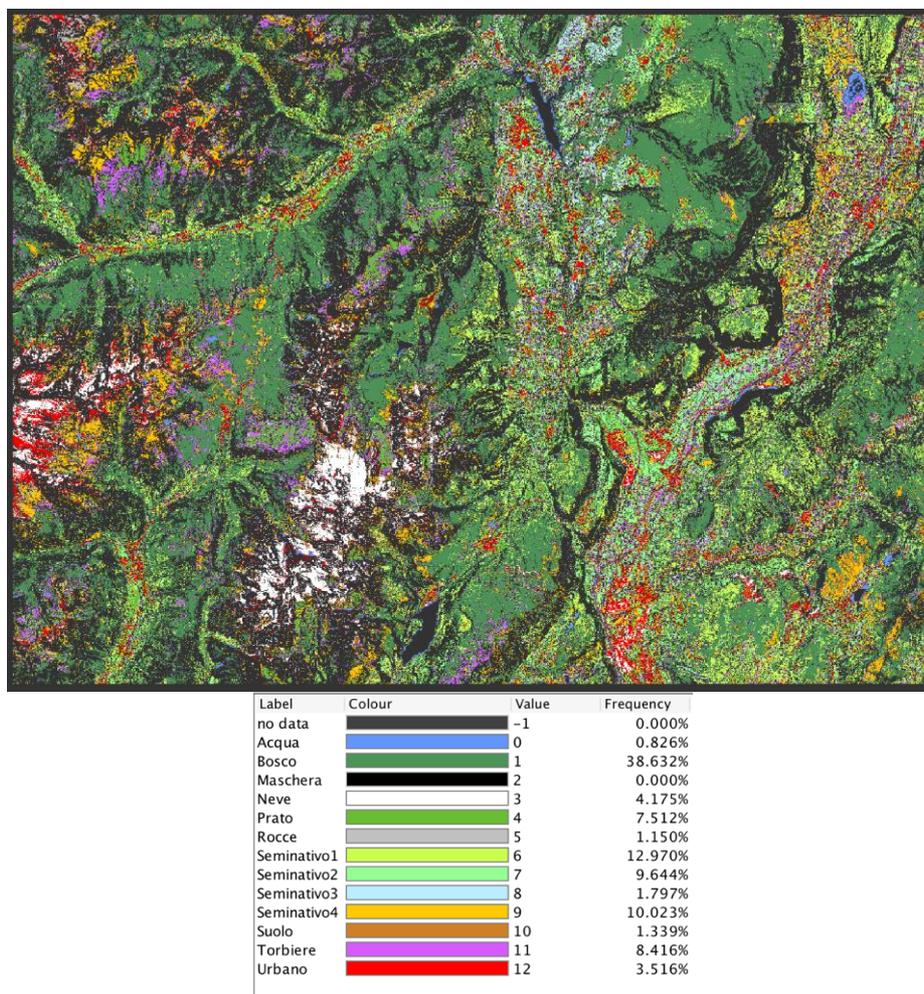


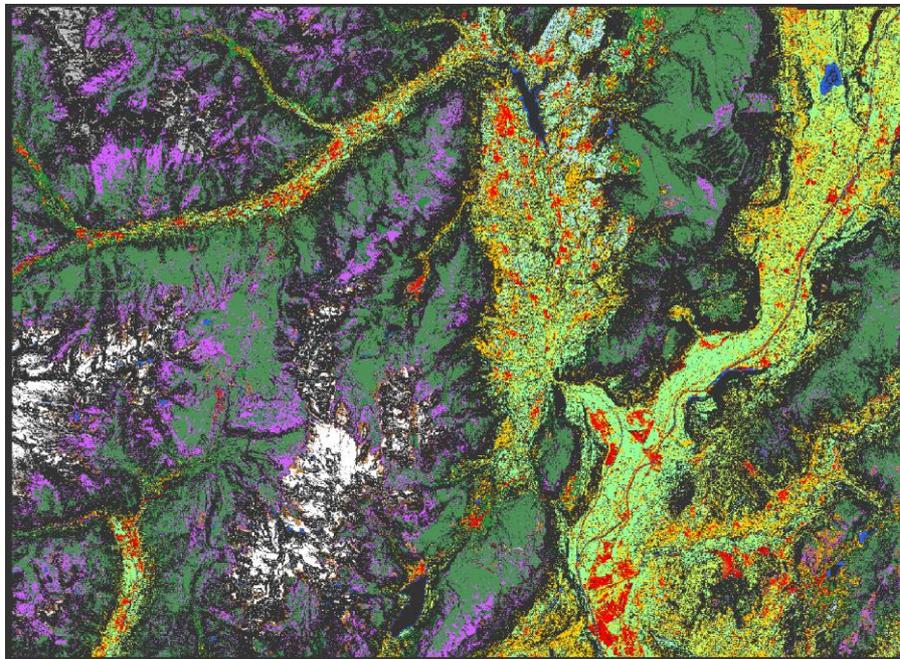
Figura 4.8: risultato della classificazione Random Forest, utilizzando 10 bande dello spettro elettromagnetico e la pendenza (11 bande), con relativa legenda.

L'immagine 4.9 mostra i dati di output ottenuti incrementando il numero di bande utilizzate per discriminare le diverse classi di copertura del suolo, aggiungendo alle sole bande Sentinel-2 la quota e la pendenza.

La percentuale di frequenza dei pixel all'interno della classe "torbiere", del 13.6% evidenzia un aumento della sovrastima di queste aree, soprattutto nelle zone coperte da "prato" e "bosco".

La classificazione, tuttavia, risulta essere più efficiente per la classe "urbano", meglio discriminata dalle classi "rocce" e "neve", a cui segue un incremento della frequenza percentuale dei pixel, rispettivamente di 2.4% e 4.5%, e per la classe "suolo", che viene classificata correttamente nella zona sud-est.

La classe "acqua" diminuisce nuovamente la sua stima, mentre aumenta il grado di discriminazione tra "seminativo 1" e "seminativo 2".



Label	Colour	Value	Frequency
no data		-1	0.000%
Acqua	Blue	0	0.525%
Bosco	Green	1	31.611%
Maschera	Black	2	0.000%
Neve	White	3	4.454%
Prato	Light Green	4	5.492%
Rocce	Grey	5	2.355%
Seminativo1	Yellow-Green	6	10.494%
Seminativo2	Light Green	7	12.243%
Seminativo3	Light Blue	8	2.332%
Seminativo4	Yellow	9	12.325%
Suolo	Brown	10	1.341%
Torbiere	Purple	11	13.608%
Urbano	Red	12	3.218%

Figura 4.9: risultato della classificazione Random Forest, utilizzando 10 bande dello spettro elettromagnetico, la quota e la pendenza (12 bande), con relativa legenda.

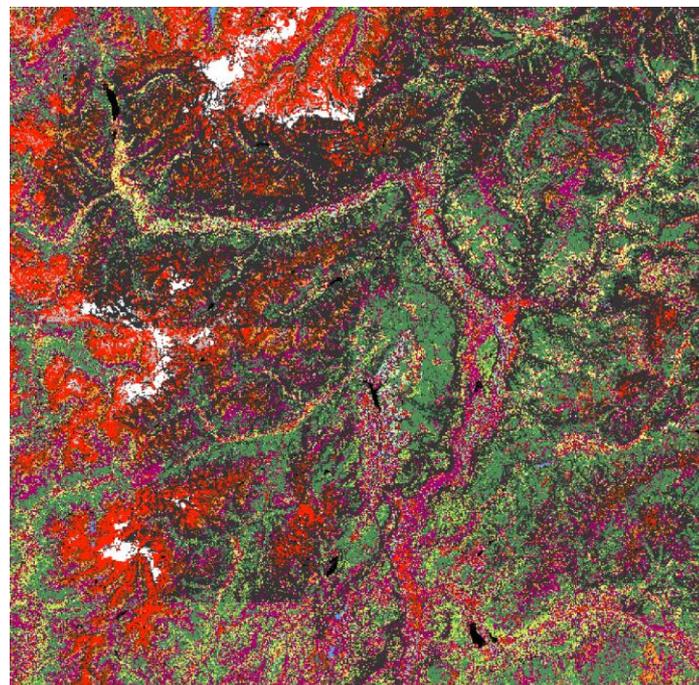
4.5.1 CLASSIFICAZIONE SU IMMAGINE SENTINEL-2

La classificazione è stata, in ultimo, estesa all'immagine satellitare Sentinel-2 completa. In questo caso, per effettuare in modo soddisfacente il *training* dell'algoritmo, sono stati considerati un numero di 5000 *training samples* e 200 alberi. Le bande utilizzate come base per la discriminazione delle diverse classi di copertura del suolo sono le sole 10 dello spettro elettromagnetico.

I risultati mostrati in figura 4.10 evidenziano una buona stima per le classi "bosco" e "seminativo 3". Le percentuali di frequenza dei pixel all'interno di queste classi sono piuttosto conformi con la copertura media del suolo dell'area presa in esame, ovvero 27.9 % per "bosco" e 2.3% per "seminativo 3".

I dati di output relativi alle classi "torbiere" e "urbano", rispettivamente con 24.6% e 13% di frequenza di pixel, risultano essere fortemente sovrastimati. Le "torbiere" vengono rappresentate, erroneamente, soprattutto nelle aree coperte da prato, bosco e nelle zone di seminativo. I pixel classificati come "urbano" restano stimati soprattutto nelle aree montuose a discapito della copertura di "neve" e "rocce".

Il "suolo" nudo viene confuso, anche in questo caso, con la classe "seminativo 4". Fortemente sottostimate risultano essere le classi di "rocce", "acqua" e "prato", rispettivamente classificate in modo errato come "urbano", "maschera" e "seminativo 2".



Label	Colour	Value	Frequency
no data		-1	0.000%
Acqua	Blue	0	0.169%
Bosco	Green	1	27.852%
Prato	Light Green	2	3.648%
Neve	White	3	1.881%
Maschera	Black	4	0.803%
Roccia	Grey	5	1.772%
Suolo nudo	Brown	6	4.601%
Urbano	Red	7	13.171%
Torbiera	Purple	8	24.587%
Seminativo1	Light Green	9	7.800%
Seminativo2	Yellow	10	5.265%
Seminativo3	Light Blue	11	2.336%
Seminativo4	Orange	12	6.116%

Figura 4.10: risultati della classificazione Random Forest applicata all'immagine satellitare Sentinel-2, con relativa legenda.

4.6 VALIDAZIONE DEL METODO

Per determinare la procedura ottimale di classificazione è stato effettuato un confronto tra i diversi risultati ottenuti. Le tabelle seguenti mostrano le matrici di errore, sviluppate per la classificazione *Random Forest*, relativa alla porzione dell'immagine satellitare Sentinel-2, con l'impiego di 10, 11 e 12 bande.

Gli errori di commissione delle aree mascherate sono molto alti in tutte e tre le matrici, con valori maggiori o uguali al 50%. In tabella 4.2 e 4.3 si possono notare anche molti pixel classificati come "urbano", rispettivamente 66 e 60, che rispecchiano la sovrastima sulle aree montuose osservata nelle immagini di classificazione con 10 e 11 bande e che portano l'errore di commissione per questa classe al 41% e 32%.

La classificazione con 12 bande ottiene un valore di accuratezza complessiva dell'84%, di accuratezza di classificazione delle torbiere di 0.9 e statistica "Kappa" di 0.83 (Tab. 4.5). Le accuratezze totali delle classificazioni *Random Forest* con 10 e 11 bande sono pari al 78% e i valori di coefficiente di accordo k sono di poco più bassi, precisamente 0.76 (Tab. 4.5). Differente è invece l'accuratezza di classificazione delle "torbiere", in cui la classificazione con l'aggiunta della banda della pendenza presenta un valore di 0.84 (Tab. 4.5), con 42 aree di torba classificate correttamente e 8 pixel omessi (Tab. 4.3), contro lo 0.9 della classificazione a 10 bande (Tab. 4.2).

La stima peggiore ottenuta dalle classificazioni, con meno di 30 pixel classificati correttamente, sono per la classe "neve", nella classificazione a 10 bande (Tab. 4.2), "acqua" e "neve" per quella a 11 bande (Tab. 4.3) e per la classificazione a 12 bande "bosco" e "acqua" (Tab. 4.4).

Gli errori di commissione delle tre classificazioni, per la categoria delle torbiere presentano valori compresi tra 10% e 15%.

	ACQUA	BOSCO	MASCHERA	NEVE	PRATO	ROCCHE	SEMINATIVO1	SEMINATIVO2	SEMINATIVO3	SEMINATIVO4	SUOLO	TORBIERE	URBANO	SOMMA	CE %	UA %
ACQUA	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	100
BOSCO	0	29	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	0	34	15	85
MASCHERA	2	6	50	4	0	9	4	4	4	5	5	2	6	101	50	50
NEVE	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	100
PRATO	0	0	0	0	37	0	0	8	0	0	0	1	0	46	20	80
ROCCHE	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	1	0	4	40	13	88
SEMINATIVO1	0	10	0	0	0	0	42	2	0	0	0	0	0	54	22	78
SEMINATIVO2	0	4	0	0	13	0	0	31	0	0	0	0	0	48	35	65
SEMINATIVO3	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	46	0	100
SEMINATIVO4	0	1	0	0	0	4	0	0	0	45	5	0	0	55	18	82
SUOLO	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	39	0	1	44	11	89
TORBIERE	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	45	0	50	10	90
URBANO	7	0	0	18	0	1	0	0	0	0	0	1	39	66	41	59
SOMMA	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	650		
OE %	18	42	0	50	26	30	16	38	8	10	22	10	22			
PA %	82	58	100	50	74	70	84	62	92	90	78	90	78			

Tabella 4.2: matrice di confusione per la classificazione Random Forest “10 Bande”. In colonna vi sono le classi delle categorie “classificate”, mentre nelle righe sono rappresentate le categorie indipendenti utilizzate per la validazione. Nota: CE: errore di commissione; UA: accuratezza utente; OE: errore di omissione; PA: accuratezza produttore.

	ACQUA	BOSCO	MASCHERA	NEVE	PRATO	ROCCE	SEMINATIVO1	SEMINATIVO2	SEMINATIVO3	SEMINATIVO4	SUOLO	TORBIERE	URBANO	SOMMA	CE%	UA%
ACQUA	26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	100
BOSCO	0	32	0	0	0	0	3	0	0	0	0	2	0	37	14	86
MASCHERA	22	6	50	2	0	8	2	3	3	4	5	4	7	116	57	43
NEVE	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	100
PRATO	0	0	0	0	37	0	0	6	0	0	0	1	0	44	16	84
ROCCE	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	2	38	5	95
SEMINATIVO1	0	8	0	0	0	0	45	2	0	0	0	0	0	55	18	82
SEMINATIVO2	0	4	0	0	13	0	0	35	0	0	0	0	0	52	33	67
SEMINATIVO3	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	46	0	100
SEMINATIVO4	0	0	0	0	0	4	0	0	0	46	5	1	0	56	18	82
SUOLO	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	40	0	0	44	9	91
TORBIERE	0	0	0	0	0	0	0	4	1	0	0	42	0	47	11	89
URBANO	2	0	0	16	0	1	0	0	0	0	0	0	41	60	32	68
SOMMA	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	650		
OE%	48	36	0	42	26	28	10	30	8	8	20	16	18			
PA%	52	64	100	58	74	72	90	70	92	92	80	84	82			

Tabella 4.3: matrice confusione per la classificazione Random Forest “11 Bande”. In colonna vi sono le classi delle categorie “classificate”, mentre nelle righe sono rappresentate le categorie indipendenti utilizzate per la validazione. Nota: CE: errore di commissione; UA: accuratezza utente; OE: errore di omissione; PA: accuratezza produttore.

	ACQUA	BOSCO	MASCHERA	NEVE	PRATO	ROCCE	SEMINATIVO1	SEMINATIVO2	SEMINATIVO3	SEMINATIVO4	SUOLO	TORBIERE	URBANO	SOMMA	CE%	UA%
ACQUA	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	100
BOSCO	0	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	26	4	96
MASCHERA	20	12	50	6	1	3	3	1	2	0	5	1	2	106	53	47
NEVE	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	0	100
PRATO	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	1	0	37	3	97
ROCCE	0	0	0	2	0	47	0	0	0	0	0	0	0	49	4	96
SEMINATIVO1	0	5	0	0	0	0	47	2	0	0	0	0	0	54	13	87
SEMINATIVO2	0	4	0	0	9	0	0	47	0	2	0	0	0	62	24	76
SEMINATIVO3	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	48	0	100
SEMINATIVO4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	1	1	0	50	4	96
SUOLO	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	43	0	1	48	10	90
TORBIERE	0	4	0	0	4	0	0	0	0	0	0	45	0	53	15	85
URBANO	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	47	51	8	92
SOMMA	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	650		
OE%	44	50	0	24	28	6	6	6	4	4	14	10	6			
PA%	56	50	100	76	72	94	94	94	96	96	86	90	94			

Tabella 4.4: matrice confusione per la classificazione Random Forest “12 Bande”. In colonna vi sono le classi delle categorie “classificate”, mentre nelle righe sono rappresentate le categorie indipendenti utilizzate per la validazione. Nota: CE: errore di commissione; UA: accuratezza utente; OE: errore di omissione; PA: accuratezza produttore.

ACCURATEZZA TOTALE %	RF 10 BANDE	RF 11 BANDE	RF 12 BANDE
	78	78	84
STATISTICA K	0.76	0.76	0.83
ACCURAREZZA CLASSIFICAZIONE TORBIERE	0.9	0.84	0.9

Tabella 4.5: accuratezza totale, statistica “Kappa” e accuratezza di classificazione torbiere di ciascuna classificazione Random Forest.

4.7 RISULTATI DELLE ANALISI DI LABORATORIO

4.7.1 DENSITÀ APPARENTE SECCA

La densità apparente secca (*dry Bulk Density - BD*) (Tab. 4.6) dei 17 campioni analizzati mostra valori medi, calcolati per tre regimi di profondità, che passano da 0.10 g/cm³, per spessore dell’orizzonte torboso compreso tra 0-50 cm, a 0.16 g/cm³, per i campioni prelevati tra 50 e 100 cm e diminuiscono nuovamente, con valori medi di 0.11 g/cm³ per i campioni prelevati a profondità maggiori di 100 cm, in cui viene compreso anche il campione “3B 87-137-143”, risultato dell’unione di due campionamenti (Fig. 4.11).

I campioni poco profondi compresi nell’intervallo tra 0 e 50 cm, prelevati nel sito 1, mostrano una densità apparente secca maggiore (0.10 - 0.11 g/cm³) rispetto ai campioni del sito 2 (0.09 g/cm³) e 4 (0.07 – 0.09 g/cm³), ma minori rispetto al sito 3 (0.16 g/cm³) (Tab. 4.6). Tra la profondità compresa tra 50 cm e 1 metro, invece, i campioni che presentano BD maggiore e minore sono entrambi appartenenti al sito 4, con valori rispettivamente di 0.31 g/cm³ e 0.07 g/cm³ (Tab. 4.6).

Nei siti 3 e 4 la profondità di torba campionata supera il metro e in questo caso il valore massimo di BD è nel campione 4B 150-180 cm, con 0.14 g/cm³.

Tutti i campioni sono compresi tra valori di 0.07 g/cm³ e 0.21 g/cm³, ad eccezione del campione “4A 50-87” che mostra quasi il doppio di valore di BD rispetto alla media (Fig. 4.12).

Nome campione (sample)	Bulk density (BD) [g/cm ³]
1A 0-22cm	0.11
1B 0-20cm	0.10
2A 0-39cm	0.09
2A 50-90cm	0.21
2B 8-50cm	0.09
2B 50-66cm	0.10
3A 50-100cm	0.14
3B 50-87cm	0.15
3B 87-137-143cm	0.11
3C 0-50cm	0.16
3C 50-100cm	0.17
4A 0-50cm	0.09
4A 50-87cm	0.31
4B 0-50cm	0.07
4B 50-100cm	0.07
4B 100-150cm	0.07
4B 150-180cm	0.14

Tabella 4.6: densità apparente secca calcolata per ciascun campione.

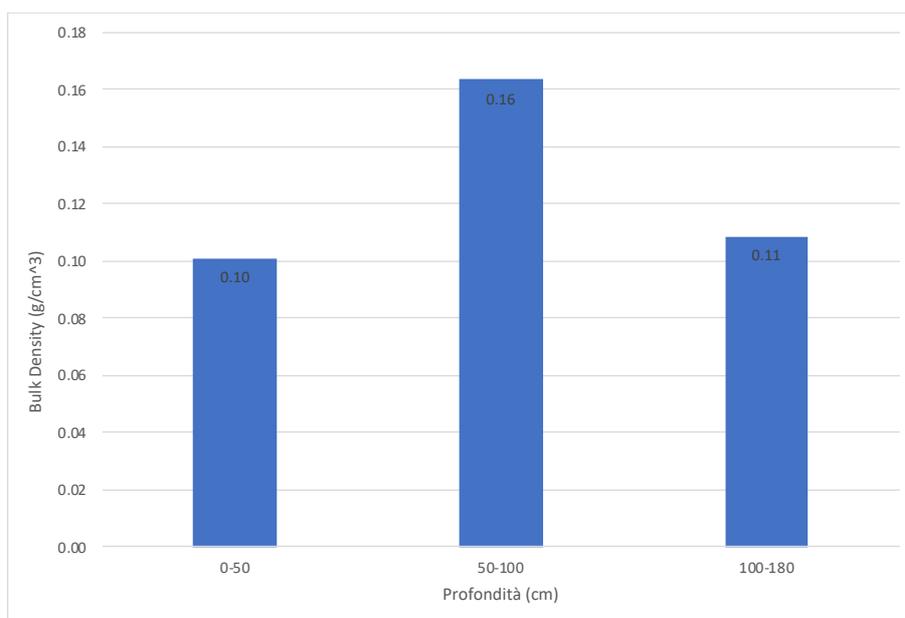


Figura 4.11: densità apparente secca (Bulk density (g/cm³)) media, calcolata per tre regimi di profondità: 0-50 cm, 50-100 cm, 100-180cm.

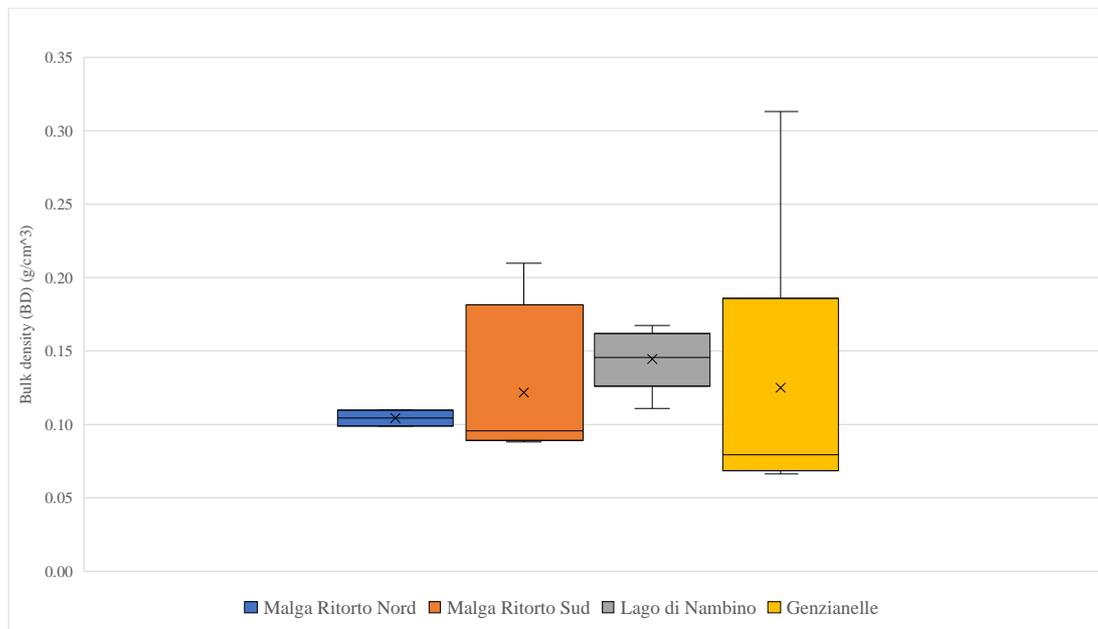


Figura 4.12: valori della Bulk Density (g/cm^3) di ciascun campione, illustrati tramite diagramma a scatola e baffi: le caselle rappresentano il primo e il terzo quartile, divise dalla linea della mediana, i baffi si estendono tra il valore massimo e il valore minimo e infine la croce rappresenta la media.

4.7.2 CONTENUTO DI CARBONIO ORGANICO PER VOLUME DI SUOLO

Il contenuto di sostanza organica nei suoli (*Soil Organic Matter* – SOM), è stato recuperato attraverso il calcolo LOI. In questo caso, a profondità di campionamento di 50-100 cm si riscontrano i valori medi di materia organica più bassi, ovvero del 53% (Tab. 4.7).

La distribuzione della sostanza organica dei suoli all'interno dei campioni risulta essere poco simmetrica; i valori di mediana, che riassumono la tendenza centrale della distribuzione, sono circa 50% per i siti Malga Ritorto Nord e Lago Nambino e circa 70% per i siti Malga Ritorto Sud e Genzianelle (Fig. 4.13 (a)).

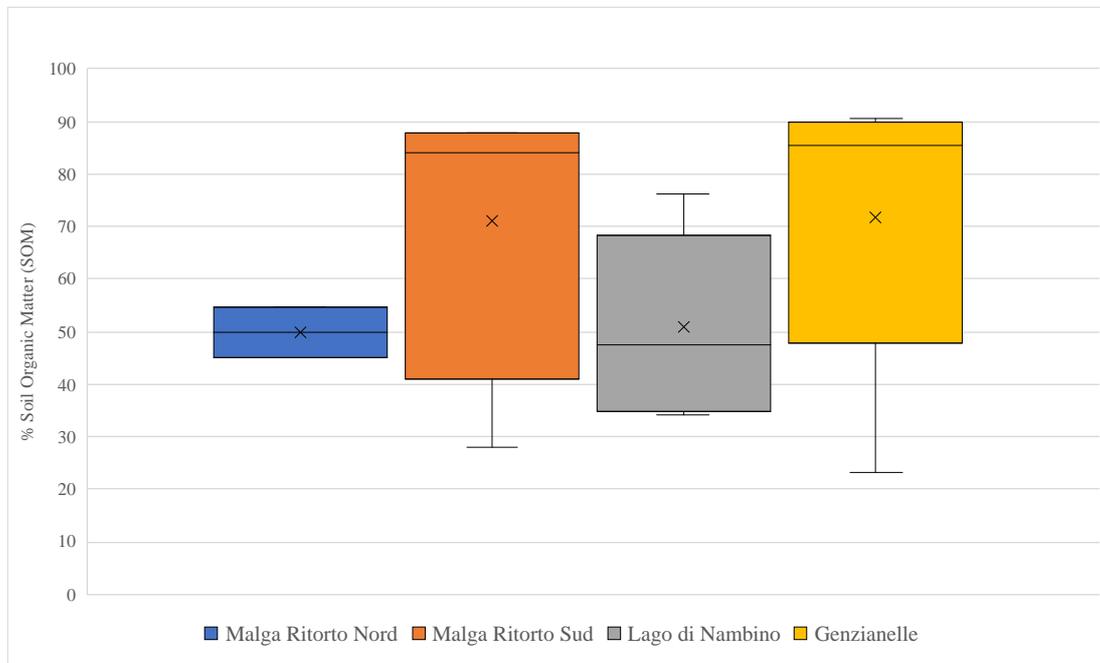
Per la determinazione del carbonio organico il valore di contenuto della materia organica all'interno del suolo è stato diviso per 1.724. Infatti, tenendo conto che il carbonio rappresenta il principale elemento presente all'interno della materia organica, costituendone dal 48% al 58% del peso totale, la costante 1.724, che prende il nome di fattore di Van Bemmelen, è basata sull'assunzione che il carbonio organico costituisca il 58% della materia organica totale (Nelson & Sommers, 1996).

Essendo collegato al valore SOM, anche per il contenuto di carbonio organico si notano valori medi del 31% per i campioni prelevati a profondità comprese tra 50-100 cm, 37% per i campioni più profondi (100-180 cm) e 40% per quelli più superficiali (0-50cm) (Tab. 4.7).

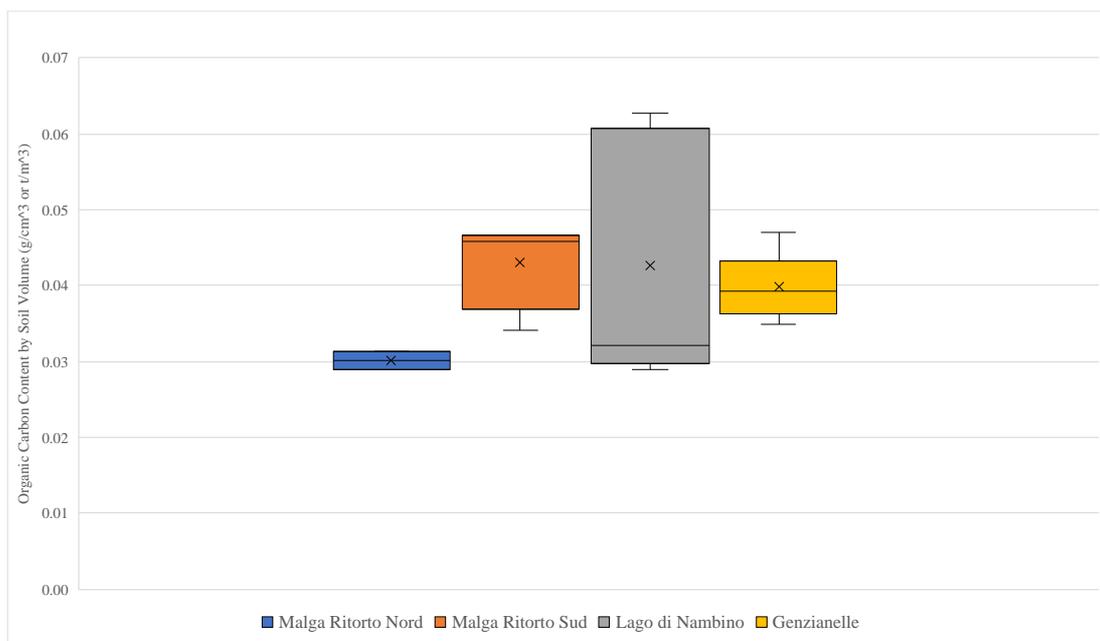
Il contenuto di carbonio organico per volume di suolo (*Organic Carbon by Soil Volume*) è distribuito più uniformemente (Fig. 4.13 (b)), con valore minimo di 0.0289 g/cm³ e massimo di 0.0626 g/cm³, ottenuti rispettivamente nel campione “1A 0-22” e “3A 50-100” (Tab. 4.7).

Nome campione (sample)	% Soil Organic Matter (SOM)	% Corg	Bulk density (BD) [g/cm ³]	Organic Carbon Content by Soil Volume [g/cm ³ or t/m ³]
1A 0-22cm	45	26	0.1106	0.0289
1B 0-20cm	55	32	0.0993	0.0314
2A 0-39cm	88	51	0.0887	0.0451
2A 50-90cm	28	16	0.2098	0.0340
2B 8-50cm	88	51	0.0916	0.0466
2B 50-66cm	80	47	0.0997	0.0464
3A 50-100cm	76	44	0.1415	0.0626
3B 50-87cm	34	20	0.1457	0.0290
3B 87-137-143cm	48	28	0.1110	0.0306
3C 0-50cm	35	20	0.1572	0.0321
3C 50-100cm	60	35	0.1682	0.0590
4A 0-50cm	82	48	0.0871	0.0414
4A 50-87cm	23	13	0.3133	0.0419
4B 0-50cm	89	51	0.0719	0.0369
4B 50-100cm	91	53	0.0664	0.0349
4B 100-150cm	90	52	0.0706	0.0367
4B 150-180cm	56	32	0.1446	0.0470
Media 0-50	69	40	0.1009	0.0375
Media 50-100	53	31	0.1188	0.0380
Media 100-180	64	37	0.1087	0.0381

Tabella 4.7: Contenuto di Materia Organica nei Suoli (% SOM), Contenuto di Carbonio Organico (% Corg) e Contenuto di Carbonio Organico per Volume di Suolo (g/cm³ o t/m³), calcolati per ciascuno dei 17 campioni di torba analizzati.



(a)



(b)

Figura 4.13: (a) Soil Organic Matter (%); (b) Organic Carbon Content by Soil Volume (g/cm³ o t/m³), di ciascun campione illustrate con boxplot: le caselle rappresentano il primo e il terzo quartile, divise dalla linea della mediana, i baffi si estendono tra il valore massimo e il valore minimo e infine la croce rappresenta la media.

5. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

5.1 DATABASE DELLE TORBIERE

Le torbiere digitalizzate attraverso l'uso del software QGIS sono in tutto 71 e si estendono nella zona est della Provincia di Bolzano e nel centro-nord della Provincia di Trento.

Queste torbiere coprono un'area complessiva di 201 ha (Allegato I - Tabella 3.1) e si presentano con estensioni differenti. L'area più piccola digitalizzata, derivante dalle aree Natura 2000 di Bolzano, corrisponde a 0.09 ha, mentre la torbiera con estensione più ampia, la cui presenza è certificata dal dataset *Corine Land Cover* [2], è situata a sud-est della Provincia di Bolzano, ai confini con la Provincia di Trento e copre un'area di circa 37.91 ha. Quest'ultima rappresenta l'unica area di torba segnalata all'interno del catalogo del progetto europeo *Corine Land Cover* [2]. Come descritto in tabella 3.1 (Allegato I), la maggior parte delle torbiere situate nei confini della Provincia di Bolzano sono state individuate grazie alla consultazione del Geocatalogo provinciale [14], mentre i Biotopi Torbiera Wölfl, Torbiera Totes e Torbiera Tschingger erano incluse nell'elenco dei Siti Rete Natura 2000 [1].

Grazie ai dati forniti dal Prof. Cremonini, generati da una ricerca bibliografica a livello nazionale (Martinelli *et al.*, 2012), la quale ha generato successivamente altri tre lavori (Martinelli *et al.*, 2013; 2015; Tannemberger *et al.*, 2017), è stato possibile individuare la localizzazione di alcune torbiere site all'interno dei confini della Provincia di Bolzano. Questi tabulati forniscono, per via di un'impossibilità di avviare studi fisiologici sull'ubicazione di gran parte delle torbiere citate in bibliografia da questi studi, approssimazioni dell'ambito comunale in cui sono state individuate le torbiere. Grazie a questi dati puntuali e a una successiva conferma da parte di ulteriori dataset, è stato possibile incrementare il numero di "torbiere certe".

Le digitalizzazioni incluse nella Provincia di Trento sono tutte derivanti dal sito Rete Natura 2000 [16] e le torbiere site all'interno dell'Alta Val Rendena, comprese le quattro torbiere campionate, vengono citate anche dallo studio del Dott. Spitale (2012). Tutte le aree di torba segnalate sono state verificate e successivamente digitalizzate grazie alla possibilità di sovrapporre il *layer* dei poligoni a *Google satellite*, che ha permesso di riconoscere i confini di tali aree.

5.2 QUOTE E MASCHERE DI PENDENZA

Come discusso in precedenza (Capitolo 3.2.4 – Modello Digitale del Terreno (DTM)), il Modello Digitale del Terreno fornisce indicazioni sulla quota di un territorio (Kölbl *et al.*, 2001) e grazie a questo dato si possono estrapolare diverse informazioni, tra cui la pendenza. La quota dell'area presa in esame da questo studio è compresa tra 0 m s.l.m. e circa 3877 m s.l.m. Le torbiere digitalizzate si estendono prevalentemente nelle aree di montagna e la pendenza media massima entro cui sono localizzate è di circa 17° (Tab. 4.1).

Per garantire un margine più ampio, la maschera delle pendenze è stata creata in modo da escludere tutte le aree con pendenza maggiore o uguale a 25° (Capitolo 3.2.5 – Creazione delle maschere).

La sovrapposizione della maschera delle pendenze con l'immagine satellitare Sentinel-2 è stata eseguita con il software ENVI in quanto le limitazioni del software *open source* SNAP ne impedivano la realizzazione. Essendo un'area prevalentemente montana, con pendenza media dei rilievi montuosi abbondantemente maggiore al limite posto di 25°, il risultato di questa sovrapposizione ha permesso di escludere a priori buona parte del territorio preso in esame.

La maschera è stata considerata come una classe di copertura del suolo e anche per essa sono stati individuati insiemi di pixel utilizzati come verità a terra. In alcuni risultati di classificazione, questa “classe” aggiuntiva ha causato errori nella ripartizione dei diversi pixel. Come si è potuto osservare nelle figure 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, molti pixel della classe “acqua” vengono erroneamente raggruppati come “maschera”. Questo errore potrebbe essere causato da una bassa esposizione al Sole delle zone interessate, oppure alle diverse proprietà ottiche delle sostanze e degli organismi che causano colorazioni più scure dell'acqua, con firme spettrali poco riconducibili a quelle tipiche di questa categoria.

Nonostante abbia causato qualche errore nella classificazione, la maschera delle pendenze ha permesso di escludere pixel con bassa probabilità di ospitare aree di torba e di velocizzare il processo di classificazione.

5.3 CLASSIFICAZIONE RANDOM FOREST

A causa di problemi legati a una richiesta di calcolo troppo elevata per i mezzi disponibili, non è stato possibile implementare la classificazione su tutto il territorio preso in esame. Questo studio, tuttavia, ha permesso di sviluppare una metodologia per la mappatura delle torbiere alpine all'interno di un'area significativa, compresa nel territorio della Provincia Autonoma di Bolzano e della Provincia Autonoma di Trento. I risultati ottenuti mostrano, in generale, una sovrastima delle torbiere, soprattutto nella classificazione a 10 bande e a 12 bande. Tuttavia, la classificazione che ha prodotto l'accuratezza maggiore resta quella effettuata con 12 bande.

La classificazione a 11 bande, seppur presentando risultati migliori (ovvero minori) sulla percentuale di frequenza di pixel che vengono raggruppati all'interno della classe "torbiere", risulta essere la classificazione meno performante, con accuratezza di classificazione delle torbiere più bassa (0.84). L'accuratezza totale di classificazione e la statistica "Kappa" sono risultate equivalenti a quelle ottenute con classificazione a 10 bande, ma sempre peggiori rispetto a quelle relative alla classificazione a 12 bande.

Il motivo di questa differenza di risultati nelle tre diverse classificazioni, considerando l'utilizzo della stessa porzione di immagine satellitare e di verità a terra identiche, è causata dall'aggiunta delle bande della quota e della pendenza. La classificazione a 11 bande, come discusso in precedenza, è stata realizzata con la sola aggiunta della banda della pendenza, che causa maggiore errore di classificazione rispetto alle sole 10 bande dello spettro elettromagnetico. Essa, tuttavia, rappresenta una ulteriore caratteristica discriminativa, se unita alla banda della quota.

Gli errori nella classificazione possono essere causati da molteplici fattori, quali:

- bassa separazione tra le categorie spettrali;
- presenza di pixel misti;
- caratteristiche e frammentazione del paesaggio;
- serie temporali e stagionali.

Analizzando le firme spettrali in figura 4.6 e lo spettro medio illustrato nei grafici delle figure 5.1 e 5.2, si evince una scarsa separabilità spettrale per le categorie di "urbano", "neve", "roccia" e "suolo", e tra le classi di "torbiere", "bosco", "prato", "seminativo 2" e "seminativo 3". In particolare, lo spettro medio delle classi "roccia" e "urbano" mostra un andamento di riflettanza quasi sovrapponibile in tutte le 10 bande dello spettro elettromagnetico considerate (Fig. 5.1). Nello spettro medio mostrato in figura

5.2, invece, non vi sono firme spettrali sovrapponibili, ma le risposte di riflettanza delle cinque classi coinvolte seguono lo stesso andamento. Nel dettaglio esse sono comprese tra 0% e 10% tra le bande del visibile (banda 2, banda 3 e banda 4) e la banda 5, aumentano di valore tra la banda 6 e la banda 8A, per poi diminuire nuovamente nelle bande 11 e 12.

L'aggiunta delle informazioni di quota e di pendenza ha permesso, nella classificazione a 12 bande, di separare in maniera corretta le classi di copertura del suolo confuse con la classe "urbano". È probabile che la quota sia stata la caratteristica fondamentale nella discriminazione tra questi tipi di classi. Questo perché la maggior parte del territorio urbano è compreso all'interno delle valli, mentre le aree principalmente composte da substrato litico e neve si trovano in prossimità dei rilievi montuosi e, di conseguenza, a quote più elevate.

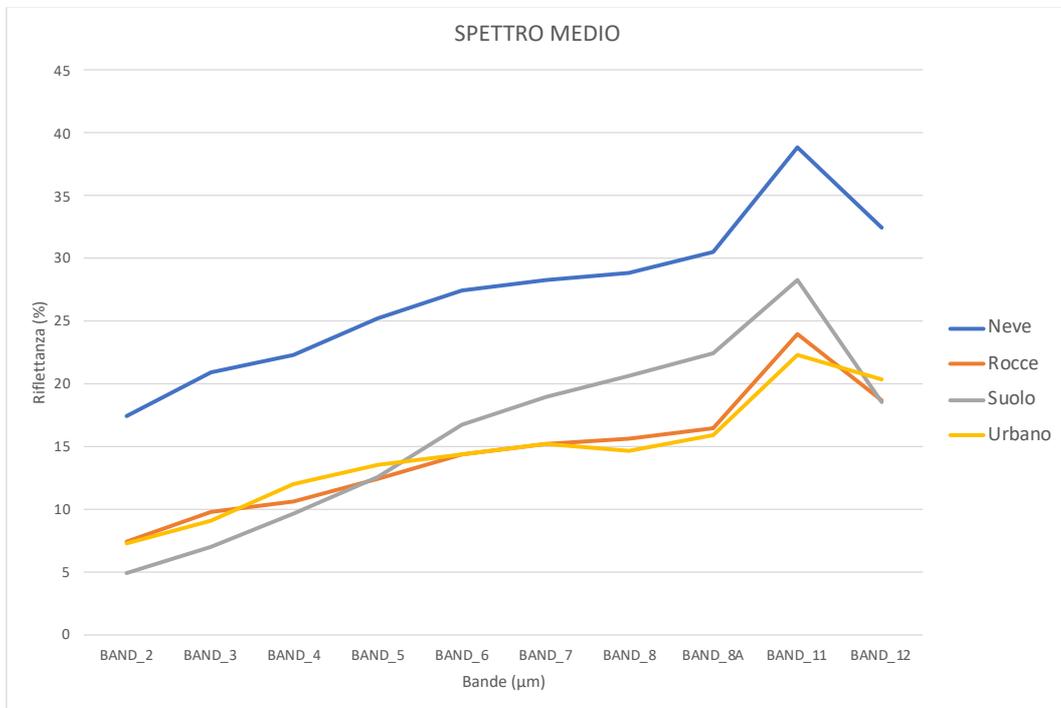


Figura 5.1: spettro medio delle classi "neve", "rocce", "suolo" e "urbano".

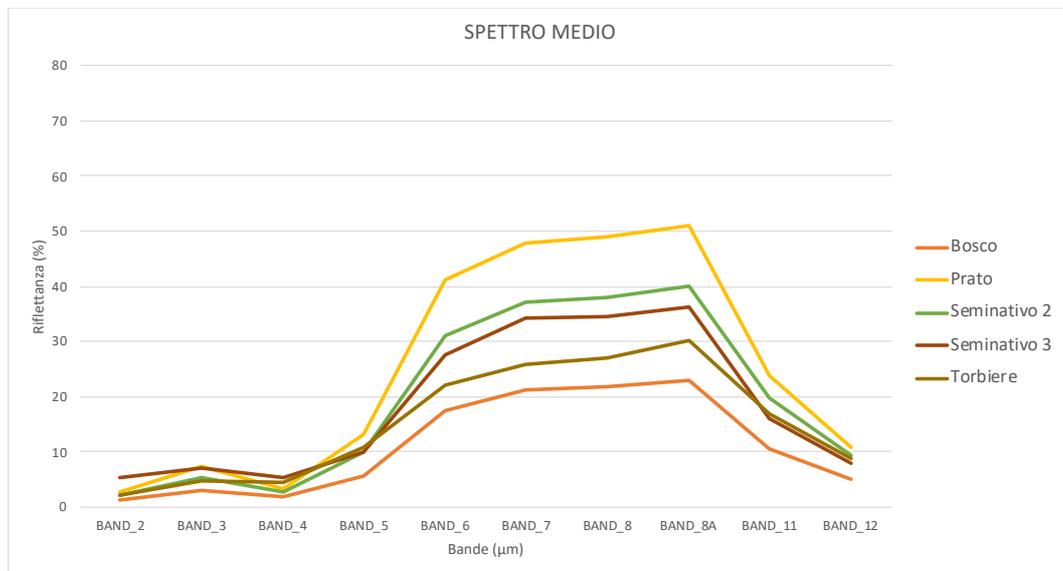


Figura 5.2: spettro medio delle classi “bosco”, “prato”, “seminativo 2”, “seminativo 3” e “torbiere”.

L’aggiunta della banda della quota non permette una migliore discriminazione delle torbiere poiché esse sono disposte in aree piuttosto montuose, caratterizzate anche da zone boschive e aree di pascolo (prato). Come si può osservare in figura 4.9, la classificazione a 12 bande ha addirittura causato un aumento della stima dei pixel classificati nella classe delle “torbiere”, sovrastimando la loro presenza soprattutto nelle aree prossime ai rilievi montuosi.

La seconda causa degli errori di classificazione è la presenza di pixel misti, ovvero di pixel non omogenei, le cui caratteristiche rientrano in due o più classi di copertura del suolo. Le aree di torba, spesso, sono poste in prossimità di zone boschive o in aree limitrofe a laghi. L’inclusione di questi pixel all’interno dei poligoni potrebbe causare errori nella valutazione delle diverse firme spettrali e, di conseguenza, assegnazioni dei pixel casuali in classi errate; tuttavia, per ovviare a questo tipo di errore, gli insiemi di pixel utilizzati come verità a terra sono stati campionati in aree più piccole rispetto all’estensione vera e propria della torbiera.

Gli ultimi due fattori da tenere in considerazione nella valutazione degli errori della classificazione sono le caratteristiche del paesaggio e l’influenza della stagionalità. In questo caso specifico, la topografia complessa del paesaggio montano e la sua vasta frammentazione rende difficile distinguere, e di conseguenza suddividere, le diverse classi di copertura del suolo. La riflettanza, infatti, può essere influenzata dall’esposizione del terreno rispetto all’illuminazione solare e alla direzione di vista del satellite. Poiché le torbiere si trovano su terreni pendenti (anche se in modo contenuto),

la loro esposizione cambia e quindi anche la riflettanza misurata da satellite. Inoltre, la dimensione ridotta delle torbiere alpine e il fatto che siano spesso in prossimità di altre zone umide, rende queste aree difficili da mappare (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2018).

Importante è anche considerare che certe variabili delle torbiere, come regime idrologico, vegetazione e forma del terreno, possono essere utilizzate per identificare queste aree, sia sul campo che nelle immagini da telerilevamento (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2017). È quindi di fondamentale importanza tenere conto anche della dipendenza della copertura vegetale dalla stagionalità. Il motivo per cui certe aree di prato, di bosco e di seminativo siano state incluse nella classe delle torbiere potrebbe quindi essere influenzato dallo stato della copertura vegetale quando l'immagine satellitare Sentinel-2, a cui è stato applicato l'algoritmo di classificazione, è stata acquisita, ovvero in settembre.

Nonostante la grande sovrastima delle aree di torba legata a tutte le classificazioni *Random Forest*, l'aggiunta della quota e della pendenza, applicate alla classificazione a 12 bande, fornisce un risultato migliore rispetto a quelle effettuate con 10 e 11 bande, ottenendo un valore di accuratezza complessiva di 84% e di statistica "Kappa" pari a 0.83 (Tab. 4.5).

Le bande della quota e della pendenza permettono infatti di discriminare meglio le classi di "urbano", "rocce", "suolo" e "neve", e pur sovrastimando la copertura totale delle aree di torba, con 53 pixel inseriti in questa classe (Tab. 4.4), rispetto ai 50 e 47 delle precedenti classificazioni (Tab. 4.2; 4.3), l'accuratezza di classificazione delle torbiere, pari a 0.9, permette di considerare questo tipo di classificazione la più performante.

5.3.1 PROPOSTE DI AVANZAMENTO DELLO STUDIO

Dai risultati ottenuti dalle tre classificazioni *Random Forest* effettuate, e sulla base delle considerazioni fatte nella sezione precedente, possiamo concludere che ulteriori studi potrebbero consentire di migliorare il metodo di mappatura delle torbiere alpine. Molteplici fattori, infatti, possono influenzare la qualità del risultato della classificazione.

La principale limitazione di questo studio è legata all'impossibilità di estendere la classificazione a un'area più grande a causa dei limiti posti dai mezzi informatici a disposizione. Il primo scopo di un futuro lavoro potrebbe quindi coinvolgere un'area di studio maggiore per permettere un incremento sia del numero di pixel usati come verità

a terra, che di classi di copertura del suolo. Come si può notare dall'ultima prova di classificazione effettuata (Fig. 5.3), aumentando la suddivisione, in questo caso della classe "prato", aumenta la discriminazione per questo tipo di categoria.

Per la mappatura delle aree umide, e quindi delle torbiere, negli studi recenti vengono sempre più utilizzati sensori multipli (sensori termici, ottici, dati LiDAR e *Synthetic Aperture Radar* - SAR), dati ausiliari (Modelli Digitali di Elevazione - DEM e precipitazioni) e immagini rappresentative della stagionalità della vegetazione (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2018).

Per considerare la stagionalità della copertura vegetale caratteristica delle torbiere, che può influenzare i valori di riflettanza, sarebbe opportuno effettuare classificazioni su immagini satellitari acquisite in diversi periodi dell'anno.

Ai fini di migliorare i risultati della classificazione e di conseguenza sviluppare un metodo più efficiente per la mappatura delle torbiere alpine, le immagini radar Sentinel-1 potrebbero rappresentare una alternativa o, ancora meglio, un'aggiunta alle immagini satellitari Sentinel-2, utilizzate in questo studio. Infatti, il segnale riflesso alle lunghezze d'onda corrispondenti alle microonde, essendo influenzato dall'umidità del terreno, fornisce importanti informazioni sul contenuto di acqua del suolo (Verhoest *et al.*, 2008), rappresentando quindi una buona possibilità di discriminazione dei terreni delle torbiere, da quelli di prato, bosco e seminativo.

Una tipologia di sensore attivo spesso utilizzata è il radar ad apertura sintetica (SAR), tecnica radar che permette la ricezione di immagini ad alta risoluzione. In questo caso, l'antenna posta sul sensore cattura le onde elettromagnetiche riflesse dall'oggetto target. Il nome "apertura sintetica" deriva dal fatto che, essendo un sensore posto su una piattaforma mobile, il risultato finale sarà una combinazione di segnali ricevuti e allineati tra di loro (antenna virtuale), che avranno una lunghezza maggiore rispetto a quella dell'antenna di ricezione vera e propria (Moreira *et al.*, 2013). I dati raccolti da questo sensore possono essere utili per la mappatura delle torbiere alpine, grazie alla capacità di rilevare l'umidità e le variazioni di biomassa (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2017).

Si ritiene infatti che per riconoscere e distinguere i diversi tipi di torbiere tramite telerilevamento sia fondamentale comprendere la loro ecologia, regime idrologico, le caratteristiche del paesaggio in cui sono rappresentate e la tendenza stagionale (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2017). Da questa base ulteriori studi potrebbero implementare

la capacità di discriminare le diverse classi di copertura del suolo e quindi migliorarne il metodo di mappatura.

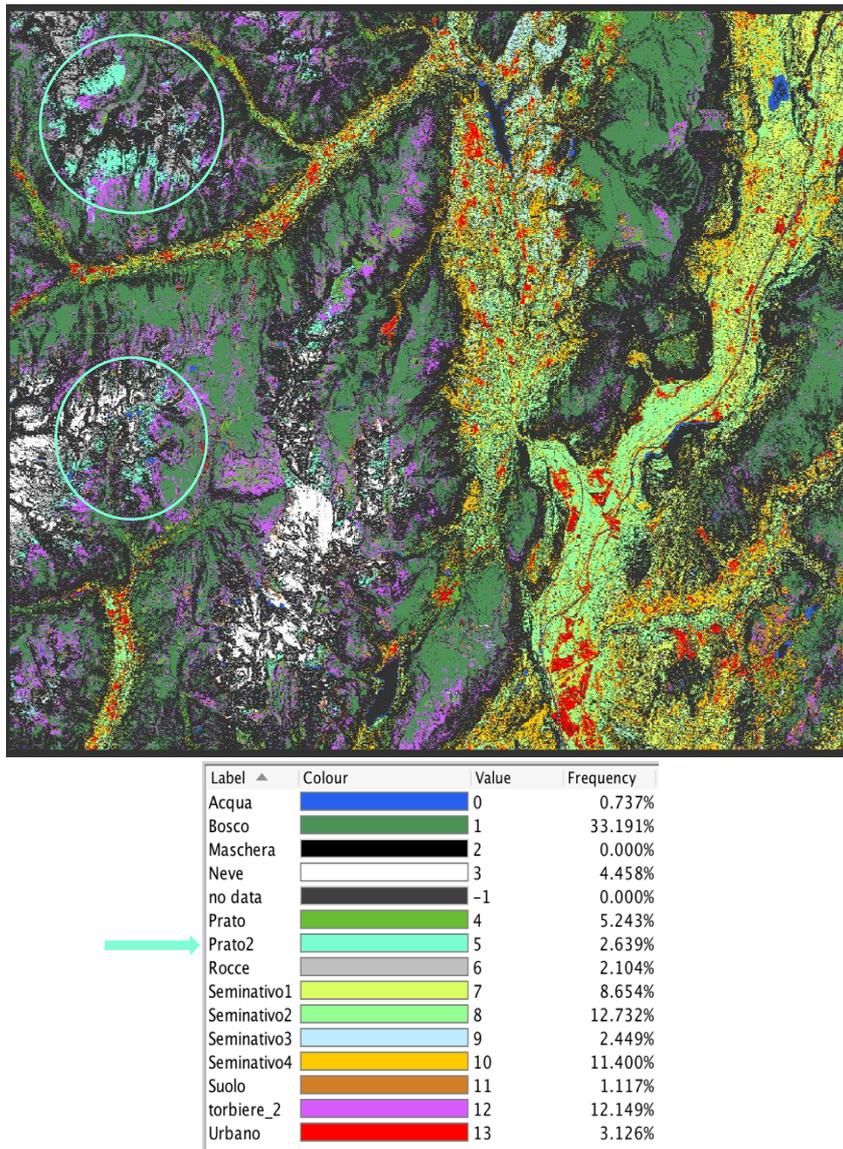


Figura 5.3: classificazione Random Forest a 12 bande effettuata suddividendo la classe di copertura del suolo "prato".

5.4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI DELLE ANALISI DI LABORATORIO

Dalle analisi effettuate in laboratorio sui 17 campioni di torba, prelevati nell'area dell'Alta Val Rendena, si evidenzia una densità apparente secca con valore medio massimo (0.16 g/cm^3) a profondità di campionamento comprese tra 50 cm e 100 cm (Fig. 4.11).

Studi precedenti condotti sulle torbiere norvegesi (Silvestri *et al.*, 2019a) mostrano un contenuto di sostanza organica dei suoli, nella maggior parte dei campioni, maggiore del 90% e ad essi è associata una densità apparente secca media minore rispetto a quella riscontrata in questo studio. I 17 campioni analizzati mostrano un contenuto percentuale di SOM molto variabile. I campioni prelevati a profondità comprese tra 0-50 cm presentano BD media di 0.10 g/cm^3 e SOM media di 69%, i campioni a profondità di 50-100 cm BD di 0.16 g/cm^3 e SOM di 53%, mentre i campioni tra 100 e 180 cm hanno BD di 0.11 g/cm^3 e SOM di 64% (Fig. 4.11; Tab. 4.7).

La densità apparente secca è strettamente legata alla quantità di materia organica presente all'interno del suolo. Quest'ultima possiede infatti densità molto più bassa rispetto alle particelle minerali (Hossain *et al.*, 2015); di conseguenza, un suolo più minerale avrà BD maggiore rispetto a un suolo più organico.

In figura 5.4 si mostra la relazione tra densità apparente secca e sostanza organica contenuta all'interno del suolo torboso dei 17 campioni analizzati e in due ulteriori studi condotti sulle torbiere alpine (Segnana *et al.*, 2020; Poto *et al.*, 2013).

La tendenza generale della maggior parte dei campioni osservati è riconducibile a una proporzionalità inversa tra le due grandezze, ovvero a BD maggiore corrispondono valori di SOM bassi, come riscontrato nei campioni "4A 50-87" e "2A 50-90" (0.31 g/cm^3 e 0.21 g/cm^3), che contengono materia organica rispettivamente al 23% e 28%. Tale comportamento si riscontra anche in due risultati dello studio condotto da Poto *et al.* (2013), sulla Torbiera di Danta di Cadore, localizzata in Provincia di Belluno. Per le profondità comprese tra 0-450 cm la densità apparente è compresa tra 0.03 e 0.11 g/cm^3 e il contenuto di ceneri (frazione inorganica) è di 1.8-4.7% (SOM media: 96.75%). A profondità maggiori, comprese tra 600 e 700 cm, si riscontrano valori di BD molto alti, pari a 0.82 g/cm^3 , a cui segue un contenuto di materia organica basso, del 10%. Lo studio condotto da Segnana *et al.* (2020) sui suoli campionati della Torbiera di Coltrondo, sita nel paese di Comelico Superiore (BL), mostra lo stesso comportamento, con valori medi di BD di 0.1 g/cm^3 e contenuto di cenere medio di 3.6% (SOM= 96.4%), per campioni di torba prelevati tra 0 e 239 cm.

A questo andamento fanno eccezione i campioni “3A 50-100”, con BD 0.14 e SOM 76%, “3C 50-100”, con valori di BD 0.17 g/cm³ e SOM 60% e il campione più profondo prelevato nel sito Genzianelle, “4B 150-180”, con BD 0.14 e SOM 56%. Per lo studio condotto da Poto *et al.*, anche la BD media (0.235 g/cm³), calcolata per la profondità compresa tra 450-600 cm mostra un contenuto di SOM maggiore rispetto alla media (92%).

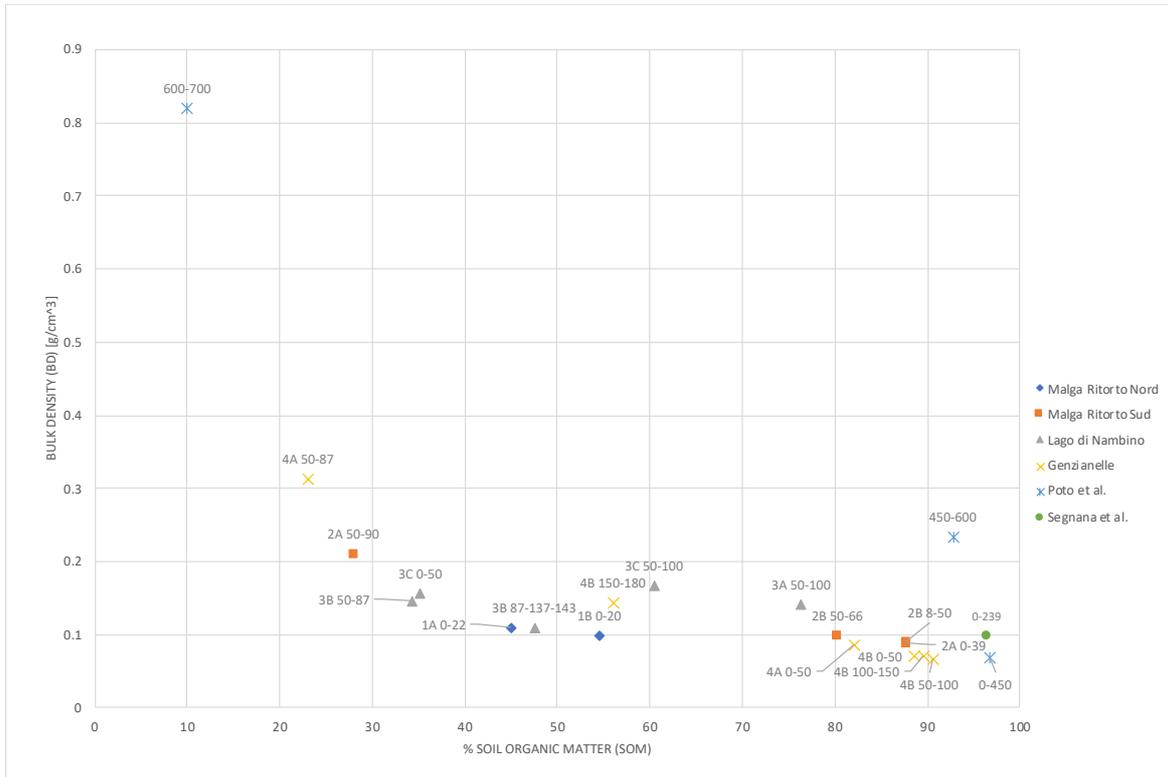


Figura 5.4: grafico a dispersione per evidenziare la relazione che intercorre tra Bulk Density (g/cm³) e Soil Organic Matter (%) nei 17 campioni e i risultati di due studi condotti sulle Alpi. Per questi ultimi il valore di SOM è stato ottenuto sottraendo a 100 il contenuto di ceneri calcolato (Poto et al., 2013; Segnana et al., 2020).

In tabella 5.1 viene mostrata la stima del contenuto di carbonio organico stoccato all’interno delle quattro torbiere campionate. Il volume totale dell’area di torba è stato ottenuto moltiplicando l’area, calcolata sui poligoni delle torbiere, per la profondità media raggiunta dalla sonda di carotaggio. In media, il contenuto maggiore di carbonio organico per volume di suolo è presente nella torbiera del sito Malga di Ritorto sud, con valori di 0.0431 g/cm³, seguito dalla torbiera nei pressi del Lago Nambino (0.0427 g/cm³).

Considerando la superficie totale delle torbiere, il sito Malga di Ritorto Nord, pur avendo la stima più bassa di carbonio organico stoccato per volume di suolo

(OCCbySV), immagazzina una quantità di carbonio organico pari a oltre 1317 t, perché il sito è molto esteso.

Pur presentando una quantità di materiale inorganico più elevata rispetto a torbiere campionate in altre aree (Silvestri *et al.*, 2019a; 2019b), il contributo stimato di stoccaggio di carbonio dei quattro siti esaminati è compreso tra circa 434 t e 1317 t, stima che fornisce anche a queste torbiere un importante ruolo nella mitigazione dei cambiamenti climatici. Se poi considerassimo una profondità media di 1 m per tutte le 71 torbiere individuate in questo studio, data la loro superficie totale pari a 2010141 m² e data una OCCbySV media di 0.0403 t/m³, possiamo dire che il territorio montuoso del Trentino-Alto Adige ospita all'interno delle torbiere almeno 81008 t di carbonio organico.

Il contenuto di carbonio organico stoccato all'interno di queste torbiere non è sicuramente paragonabile a quello delle torbiere dell'Indonesia (22100 kt) (Silvestri *et al.*, 2019b) o della Norvegia (Sito 1: 34 kt e Sito 2: 6.7 kt) (Silvestri *et al.*, 2019a) ma è comunque importante. Il valore delle torbiere va infatti ricercato non soltanto nella loro capacità di stoccare carbonio, ma anche negli altri servizi ecosistemici; esse sono infatti risorse di biodiversità, coprono un ruolo rilevante nella regolazione dell'acqua e rappresentano importanti archivi paleoambientali.

	Area [m ²]	Altezza [m]	Volume [m ³]	OCCbySV [t/m ³] medio	OCC [t]
Malga Ritorto Nord	208079	0.21	43696.59	0.0302	1317.70
Malga Ritorto Sud	26256	0.6125	16081.8	0.0431	692.34
Lago di Nambino	11977	0.96	11497.92	0.0427	490.39
Genzianelle	10614	1.028	10911.192	0.0398	434.31

Tabella 5.1: stima del contenuto di carbonio organico stoccato all'interno delle torbiere campionate.

6. CONCLUSIONI

Grazie a questo studio è stato possibile raggruppare, in un unico file vettoriale, la maggior parte delle torbiere comprese all'interno dell'area presa in esame, la cui presenza risulta essere confermata tramite analisi visive di immagini satellitari *Google Satellite*.

È stata sviluppata, inoltre, una metodologia per la mappatura delle torbiere alpine che, pur portando sovrastime nella loro classificazione all'interno dell'immagine Sentinel-2 classificata, permette la definizione della regione alpina come area potenzialmente rappresentata da un numero elevato di torbiere.

La possibilità di mappare queste aree, grazie ai vari metodi di telerilevamento, rappresenta un'importante risorsa per il monitoraggio dello stato di conservazione delle torbiere alpine. Distinguere e monitorare i vari tipi di torbiere a scala regionale ha infatti implicazioni importanti sull'inventario, sulla conservazione, sulla stima dell'immagazzinamento e delle emissioni di carbonio, e sul monitoraggio dei fattori ecologici in un clima che è in fase di cambiamento (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2017).

Studi al riguardo mostrano la fragilità di questi territori nei confronti delle azioni antropiche e del cambiamento climatico (Bourgeau-Chavez *et al.*, 2018; Uddin *et al.*, 2019) e di quanto sia di fondamentale importanza, nella lotta a quest'ultimo, monitorare e proteggere tali aree (Silvestri *et al.*, 2019a; Bonn *et al.*, 2014).

Questo studio offre una base su cui lavorare per migliorare le metodologie di mappatura, con lo scopo di ottenere stime migliori della distribuzione delle torbiere nella zona alpina, dove gli studi attuali sono disomogenei e poco chiari (Reichart & Drösler, 2020). L'importanza della mappatura di queste aree viene evidenziata anche a livello mondiale, con la pubblicazione, da parte della FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*) (2020) di una guida tecnica sul monitoraggio e la mappatura delle torbiere.

Un'ultima considerazione è che, molte delle torbiere digitalizzate, facendo parte dei Siti Rete Natura 2000 o essendo inserite in aree protette, sono incluse in politiche di protezione e di controllo del loro stato di conservazione. Stimando la quantità di carbonio organico stoccato all'interno delle torbiere campionate, tale studio si propone di fornire un contributo maggiore alla definizione dell'importanza delle torbiere localizzate nel territorio del Trentino-Alto Adige.

RINGRAZIAMENTI

Colgo l'occasione per esprimere la mia profonda gratitudine verso la mia relatrice, la Prof.ssa Sonia Silvestri, per avermi concesso l'opportunità di realizzare questa tesi, per il suo supporto e per la pazienza dimostratami in questi mesi, nonostante non fosse facile seguire un lavoro a chilometri di distanza.

Un sentito ringraziamento anche alla Dott.ssa Mariapina Castelli, correlatrice di questa tesi di laurea, per la sua supervisione e disponibilità.

Vorrei ringraziare anche l'Ufficio Pianificazione territoriale e cartografia della Provincia autonoma di Bolzano e l'Ufficio Sistemi Informativi del Dipartimento Territorio Ambiente Energia e Cooperazione della Provincia Autonoma di Trento, in particolare i rispettivi referenti, David Colmano e Monica Laudadio, per la gentilezza, la professionalità e per la trasmissione dei file relativi ai Modelli Digitali del Terreno. Ringrazio anche il Prof. Stefano Cremonini e il Dott. Giovanni Martinelli, per aver condiviso informazioni e risultati degli studi e per le esaurienti risposte.

Un Grazie particolare a mamma e a papà, perché senza di loro non sarei qui a scrivere queste righe e perché hanno sempre appoggiato ogni mia idea. Grazie per essermi stati vicino in questi cinque anni di Università e per aver vissuto ogni ansia da esame, ogni momento di gioia e di tristezza con me. Questo traguardo è anche vostro.

Vorrei ringraziare Carola, Cri, Marco e Baro, che sono le colonne portanti della mia vita.

Ringrazio tutti i miei amici del Canavese, che mi hanno mostrato quanto un sentimento vero possa sconfiggere anche la distanza e i miei amici di Ravenna, i compagni di studio migliori che potessi incontrare e che hanno condiviso con me momenti indimenticabili.

Grazie a tutto ciò che mi ha portata a questo giorno. Grazie ai giri in bicicletta per la bella e umida città di Ravenna, grazie ai viaggi in bus infiniti per tornare a casa e grazie alle mie montagne, perché sono parte di me e lo sono state anche di questa tesi.

Con l'augurio a me stessa di affrontare sempre ogni cosa con la stessa passione con cui ho affrontato questi anni, ringrazio ancora tutti.

BIBLIOGRAFIA

- Ballhorn, U., Jubanski, J., & Siegert, F. (2011). ICESat/GLAS data as a measurement tool for peatland topography and peat swamp forest biomass in Kalimantan, Indonesia. *Remote Sensing*, 3(9), 1957–1982. <https://doi.org/10.3390/rs3091957>.
- Barthelmes, A., Couwenberg, J., Risager, M., Tegetmeyer, C., & Joosten, H. (2015). Peatlands and Climate in a Ramsar context. A Nordic-Baltic Perspective. In *Peatlands and Climate in a Ramsar context* (Issue May). <https://doi.org/10.6027/tn2015-544>.
- Beani, E., Lingua, A. M., & Di Pietra, V. (2019). Produzione in cartografia tecnica in ambito comunale mediante l'utilizzo di droni. Il caso del Comune di Mappano. Politecnico di Torino.
- Boaga, J., Viezzoli, A., Cassiani, G., Deidda, G. P., Tosi, L., & Silvestri, S. (2020). Resolving the thickness of peat deposits with contact-less electromagnetic methods: A case study in the Venice coastland. *Science of the Total Environment*, 737, 11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139361>.
- Bonn, A., Reed, M. S., Evans, C. D., Joosten, H., Bain, C., Farmer, J., Emmer, I., Couwenberg, J., Moxey, A., Artz, R., Tanneberger, F., von Unger, M., Smyth, M. A., & Birnie, D. (2014). Investing in nature: Developing ecosystem service markets for peatland restoration. *Ecosystem Services*, 9, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.06.011>.
- Bourgeau-Chavez, L. L., Endres, S. L., Graham, J. A., Hribljan, J. A., Chimner, R. A., Lillieskov, E. A., & Battaglia, M. J. (2018). Mapping peatlands in boreal and tropical ecoregions. *Comprehensive Remote Sensing*, 1–9, 24–44. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10544-5>.
- Bourgeau-Chavez, L. L., Endres, S., Powell, R., Battaglia, M. J., Benscoter, B., Turetsky, M., Kasischke, E. S., & Banda, E. (2017). Mapping boreal peatland ecosystem types from multitemporal radar and optical satellite imagery. *Canadian Journal of Forest Research*, 47(4), 545–559. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0192>.
- Bracco, A., Gentili, A., Minelli, A., Solari, M., Ruffo, S., Stoch, F., & Venanzoni, R. (2004). *Le Torbiere Montane. Relitti di biodiversità in acque acide*. Ministero Dell'Ambiente e Della Tutela Del Territorio, Roma & Museo Friulano Di Storia Naturale, 27.

- Bragazza, L., & Gerdol, R. (1996). Response surfaces of plant species along water-table depth and pH gradients in a poor mire on the southern Alps (Italy). *Annales Botanici Fennici*, 33(1), 11–20.
- Bragazza, L., Rydin, H., & Gerdol, R. (2005). Multiple gradients in mire vegetation: A comparison of a Swedish and an Italian bog. *Plant Ecology*, 177(2), 223–236. <https://doi.org/10.1007/s11258-005-2182-2>.
- Breiman, L. (2001). Random Forest. *Machine Learning. International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 45, 5–32. <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2016.070603>.
- Brivio, P. A., Lechi, G., & Zilioli, E. (2006). *Principi e metodi di telerilevamento*. Città Studi Editore.
- Burdun, I., Bechtold, M., Sagris, V., Lohila, A., Humphreys, E., Desai, A. R., Nilsson, M. B., De Lannoy, G., & Mander, Ü. (2020). Satellite determination of peatland water table temporal dynamics by localizing representative pixels of a SWIR-Based Moisture Index. *Remote Sensing*, 12(18), 2936. <https://doi.org/10.3390/RS12182936>.
- Canada Centre for Remote Sensing (CCRS). (2019). *Fundamentals of Remote Sensing. A Remote Sensing Tutorial*. Natural Resources Canada.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational And Psychological Measurement*, 20(1), 37–46.
- DeMers, M. N., & Wiley, J. (1997). *Fundamentals of Geographic Information System*. John Wiley & Sons.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Peatlands mapping and monitoring - Recommendations and technical overview*. In *Peatlands mapping and monitoring*. <https://doi.org/10.4060/ca8200en>.
- Gomasca, M., Boschetti, M., Brunori, C. A., Colombo, A., & Colombo, R. (2001). *Telerilevamento. Per una cartografia tematica Lombarda*. (pp. 89–114).
- Hossain, M. F., Chen, W., & Zhang, Y. (2015). Bulk density of mineral and organic soils in the Canada's arctic and sub-arctic. *Information Processing in Agriculture*, 2(3–4), 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.09.001>.
- Khorram, S., Koch, H. F., Van Der Wiele, C. F., & Nelson, S. A. C. (2012). *Remote Sensing*. Springer.

- Kölbl, O., Di Bello, L., Afeltra, G., Cumer, A., De Paris, G., D’Orazi, M., Forlani, G., Giaggio, C., Laraia, A., & Mussio, L. (2001). Prescrizioni Tecniche per la produzione di Modelli Digitali del Terreno. 2–67.
- Kristensen, E., & Andersen, F. (1987). Determination of organic carbon in marine sediments: a comparison of two CHN-analyzer methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 109(1), 15–23. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(87\)90182-1](https://doi.org/10.1016/0022-0981(87)90182-1).
- Lees, K. J., Quaife, T., Artz, R. R. E., Khomik, M., & Clark, J. M. (2018). Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands – A review. *Science of the Total Environment*, 615, 857–874. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.103>
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation. 7th Edition. In *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (Vol. 81, Issue 8). <https://doi.org/10.14358/pers.81.8.615>.
- Limpens, J., Berendse, F., Blodau, C., Canadell, J. G., Freeman, C., Holden, J., Roulet, N., Rydin, H., & Schaepman-Strub, G. (2008). Peatlands and the carbon cycle: From local processes to global implications - A synthesis. *Biogeosciences*, 5(5), 1475–1491. <https://doi.org/10.5194/bg-5-1475-2008>.
- Liu, C., Frazier, P., & Kumar, L. (2007). Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, 107(4), 606–616. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.10.010>.
- Loisel, J., Yu, Z., Parsekian, A., Nolan, J., & Slater, L. (2013). Quantifying landscape morphology influence on peatland lateral expansion using ground-penetrating radar (GPR) and peat core analysis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(2), 373–384. <https://doi.org/10.1002/jgrg.20029>.
- Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., & Gascon, F. (2017). Sen2Cor for Sentinel-2. *International Society for Optics and Photonics*, 10427, 13. <https://doi.org/10.1117/12.2278218>.
- Martinelli, G., Cremonini, S., & Samonati, E. (2012). Geological and Geochemical Setting of Natural Hydrocarbon Emissions in Italy. *Advances in Natural Gas Technology, 1969*, 79–120. <https://doi.org/10.5772/37446>.

- Martinelli, G., Cremonini, S., & Samonati, E. (2013). The Peat Fires of Italy. *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*, 2, 205–216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59412-9.00013-2>.
- Martinelli, G., Cremonini, S., Samonati, E., & Stracher, G. B. (2015). Italian Peat and Coal Fires. *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*, 4(1922), 39–73. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59510-2.00003-3>.
- Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A Tutorial on Synthetic Aperture Radar. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Magazine*, march, 6–43.
- Nelson, D. W., & Sommers, L. E. (1996). Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. *Methods of Soil Analysis, Part 3, Chemical Methods*, 5, 961–1010.
- Parish, F. S., Charman, A., Joosten, D., Minayeva, H., T. Silvius, M., & Stringer, L. (2008). *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report., 206.
- Parry, L. E., Chapman, P. J., Palmer, S. M., Wallage, Z. E., Wynne, H., & Holden, J. (2015). The influence of slope and peatland vegetation type on riverine dissolved organic carbon and water colour at different scales. *Science of the Total Environment*, 527–528(May), 530–539. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.036>.
- Poto, L., Gabrieli, J., Crowhurst, S. J., Appleby, P. G., Ferretti, P., Surian, N., Cozzi, G., Zaccone, C., Turetta, C., Pini, R., Kehrwald, N., & Barbante, C. (2013). The first continuous Late Glacial - Holocene peat bog multi-proxy record from the Dolomites (NE Italian Alps). *Quaternary International*, 306, 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2013.05.001>.
- Reddy, Obi G. P., & Singh, S. K. (2018). *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management*. Springer.
- Reichart, A. F., & Drösler M. (2020). *Data availability of the peatlands in the Alps: Investigation of the current status, deficit-analysis and concepts for peatland corridors*. Universität München.
- Rydin, H., & Jeglum, J. K. (2006). *The Biology of Peatlands*. In Oxford University Press.
- Rydin, H., & Jeglum, J.K. (2013). *The Biology of Peatlands*, 2e. In Oxford University Press.

- Schiavon, R., & Pirotti, F. (2019). Satelliti Landsat 8 e Sentinel-3 per l'identificazione delle aree interessate da schianti da vento: il caso Vaia. Università degli Studi di Padova.
- Schowengerdt, R. A. (2007). Remote sensing: Models and methods for image processing: Second edition. In *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing: Third Edition*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-21902-7>.
- Segnana, M., Oeggl, K., Poto, L., Gabrieli, J., Festi, D., Kofler, W., Cesco Frare, P., Zaccone, C., & Barbante, C. (2020). Holocene vegetation history and human impact in the eastern Italian Alps: a multi-proxy study on the Coltrondo peat bog, Comelico Superiore, Italy. *Vegetation History and Archaeobotany*, 29(4), 407–426. <https://doi.org/10.1007/s00334-019-00749-y>.
- Silvestri, S., Christensen, C. W., Lysdahl, A. O. K., Anshütz, H., Pfaffhuber, A. A., & Viezzoli, A. (2019a). Peatland Volume Mapping Over Resistive Substrates With Airborne Electromagnetic Technology. *Geophysical Research Letters*, 46(12), 6459–6468. <https://doi.org/10.1029/2019GL083025>.
- Silvestri, S., Knight, R., Viezzoli, A., Richardson, C. J., Anshari, G. Z., Dewar, N., Flanagan, N., & Comas, X. (2019b). Quantification of Peat Thickness and Stored Carbon at the Landscape Scale in Tropical Peatlands: A Comparison of Airborne Geophysics and an Empirical Topographic Method. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(12), 3107–3123. <https://doi.org/10.1029/2019JF005273>.
- Spitale, D. (2012). Lo stato di conservazione delle torbiere dell'alta Val Rendena (Parco Naturale Adamello-Brenta). *Dendronatura*, 2, 49–55.
- Stati Membri della Convenzione delle Alpi. (2009). Piano d'azione sul cambiamento climatico nelle Alpi. 27.
- Story, M., & Congalton, R. G. (1986). Remote Sensing Brief Accuracy Assessment: A User's Perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(3), 397–399.
- Tanneberger, F., Tegetmeyer, C., Busse, S., Barthelmes, A., Shumka, S., Mariné, A. M., Jenderedjian, K., Steiner, G. M., Essl, F., Etzold, J., Mendes, C., Kozulin, A., Frankard, P., Milanović, Ganeva, A., Apostolova, I., Alegro, A., Delipetrou, P., Navrátilová, J., ... Joosten, H. (2017). The peatland map of Europe. *Mires and Peat*, 19(2015), 1–17. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.264>.

- Uddin, M. J., Mohiuddin, A. S. M., & Hassan, M. (2019). Organic Carbon Storage in the Tropical Peat Soils and Its Impact on Climate Change. *American Journal of Climate Change*, 08(01), 94–109. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2019.81006>.
- Verhoest, N. E. C., Lievens, H., Wagner, W., Álvarez-Mozos, J., Moran, M. S., & Mattia, F. (2008). On the soil roughness parameterization problem in soil moisture retrieval of bare surfaces from synthetic aperture radar. *Sensors*, 8(7), 4213–4248. <https://doi.org/10.3390/s8074213>.
- Yang, Z., D’Alpaos, A., Marani, M., & Silvestri, S. (2020). Assessing the fractional abundance of highly mixed salt-marsh vegetation using random forest soft classification. *Remote Sensing*, 12(19), 1–25. <https://doi.org/10.3390/rs12193224>.

SITOGRAFIA

[1] Amministrazione Provincia di Bolzano, 2020. Natura e ambiente. Siti Rete Natura 2000 in Alto Adige.

Disponibile su: <http://www.provincia.bz.it/natura-ambiente/natura-territorio/natura2000/siti-natura-2000-alto-adige.asp>. [consultato: 16 Dicembre 2020].

[2] Copernicus EU, 2020. Land Monitoring Service. Corine Land Cover 2018.

Disponibile su: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>. [consultato: 15 Dicembre 2020].

[3] Holden Chris, s.d. Chapter 5: Classification of land cover.

Disponibile su: https://ceholden.github.io/open-geo-tutorial/python/chapter_5_classification.html. [consultato: 25 Febbraio 2021].

[4] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), s.d. Alpi.

Disponibile su: <https://www.isprambiente.gov.it/files/notizie-ispra/notizia-2014/giro-italia/alpi.pdf>. [consultato: 3 Febbraio 2021].

[5] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), s.d. Capitolo 8: Analisi del dissesto da frana nella Provincia di Bolzano – Alto Adige Südtirol.

Disponibile su: https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/rapporti/rapporto-frane-2007/Capitolo_8_Bolzano.pdf. [consultato: 20 Dicembre 2020].

[6] Koehrsen Will, 2018. Towards data science. An Implementation and Explanation of the Random Forest in Python.

Disponibile su: <https://towardsdatascience.com/an-implementation-and-explanation-of-the-random-forest-in-python-77bf308a9b76>. [consultato: 2 Febbraio 2021].

[7] Lasen Cesare, Gerdol Renato and Bragazza Luca, s.d. Botanica e Briologia. L'importanza degli ambienti umidi.

Disponibile su: <http://www.cadore.it/danta/torbiera/Index.html>. [consultato: 15 Febbraio 2021].

[8] Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, 2020. Geoportale Nazionale. Progetto PST – Dati Lidar.

Disponibile su: <http://www.pcn.minambiente.it/mattm/progetto-pst-dati-lidar/>. [consultato: 4 Febbraio 2021].

[9] Ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare, s.d. Rete Natura 2000.

Disponibile su: <https://www.minambiente.it/pagina/rete-natura-2000>. [consultato: 20 Dicembre 2020].

[10] Ministero dell'ambiente della tutela del territorio e del mare, 2020. Zone Umide di Importanza Internazionale ai sensi della Convenzione di Ramsar.

Disponibile su: <https://www.minambiente.it/pagina/zone-umide-di-importanza-internazionale-ai-sensi-della-convenzione-di-ramsar>. [consultato: 18 Settembre 2020].

[11] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). What is lidar?

Disponibile su: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>. [consultato: 4 Febbraio 2021].

[12] Paolo Corradenghini, 2017 3DMETRICA. DTM vs DSM vs DEM.

Disponibile su: <https://3dmetrica.it/dtm-dsm-dem/>. [consultato: 3 Gennaio 2021].

[13] Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige, 2020. Parchi naturali. Parco naturale Vedrette di Ries-Aurina.

Disponibile su: <https://parchi-naturali.provincia.bz.it/parco-naturale-vedrette-di-ries-aurina.asp>. [consultato: 16 Dicembre 2020].

[14] Provincia Autonoma di Bolzano, 2020. Rete civica dell'Alto Adige. GeoCatalogo.

Disponibile su: <http://geocatalogo.retecivica.bz.it/geokatalog/#!> [consultato: 15 Dicembre 2020].

[15] Provincia Autonoma di Trento, s.d. Agenzia Provinciale per la Protezione dell’Ambiente (APPA). Acqua.

Disponibile su: <http://www.appa.provincia.tn.it/acqua/>. [consultato: 11 Dicembre 2020].

[16] Provincia Autonoma di Trento, s.d. Aree Protette del Trentino. Habitat Natura 2000.

Disponibile su:

http://www.areeprotette.provincia.tn.it/rete_ecologica_europea_Natura_2000/habitat_natura_2000/. [consultato: 16 Dicembre 2020].

[17] Provincia Autonoma di Trento, s.d. Aree Protette del Trentino. Torbiere.

Disponibile su:

http://www.areeprotette.provincia.tn.it/riserve_provinciali/tipo_ambiente/pagina3.html [consultato: 17 Dicembre 2020].

[18] Provincia Autonoma di Trento, s.d. PAT Autonomia. Territorio.

Disponibile su: http://www.autonomia.provincia.tn.it/numeri_autonomia/pagina1.html. [consultato: 20 Dicembre 2020].

[19] Provincia Autonoma di Trento, 2020. Portale Geocartografico Trentino. STEM – WebGIS.

Disponibile su: <https://siat.provincia.tn.it/stem/>. [consultato: 15 Dicembre 2020].

[20] QGIS, 2020. QGIS – il Leader dei Software GIS Desktop Open Source.

Disponibile su: <https://www.qgis.org/it/site/about/index.html>. [consultato: 25 Gennaio 2021].

[21] Regione Emilia-Romagna, 2017. Ambiente. Il rilievo LIDAR.

Disponibile su:

<https://ambiente.regione.emilia-romagna.it/it/geologia/geologia/costa/il-rilievo-lidar#autotoc-item-autotoc-3>. [consultato: 4 Febbraio 2021].

[22] The European Space Agency (ESA) & Copernicus EU, s.d. Copernicus Open Access Hub.

Disponibile su: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. [consultato: 2 Febbraio 2021].

[23] The European Space Agency (ESA), s.d. Sentinel-2 Online. Sentinel-2.

Disponibile su: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. [consultato: 13 Gennaio 2021].

[24] The European Space Agency (ESA), s.d. Toolboxes. SNAP.

Disponibile su: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>. [consultato: 25 Gennaio 2021].

[25] U.S. Geological Survey (USGS), s.d. Landsat Missions. Landsat 8.

Disponibile su: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-8?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con.

[consultato: 13 Gennaio 2021].

ALLEGATO I

Origine	Nome	Area [m2]	Area [ha]
Corine Land Cover		379110	37.91
Geocatalogo Bolzano		81222	8.12
Geocatalogo Bolzano		70535	7.05
Geocatalogo Bolzano		69287	6.93
Geocatalogo Bolzano		49205	4.92
Geocatalogo Bolzano		45497	4.55
Geocatalogo Bolzano		37131	3.71
Geocatalogo Bolzano		33970	3.4
Geocatalogo Bolzano		28889	2.89
Geocatalogo Bolzano		24663	2.47
Geocatalogo Bolzano		19786	1.98
Geocatalogo Bolzano		18651	1.87
Geocatalogo Bolzano - P.N. Vedrette Ries-Aurina		16928	1.69
Geocatalogo Bolzano		15431	1.54
Geocatalogo Bolzano		14744	1.47
Geocatalogo Bolzano		14303	1.43
Geocatalogo Bolzano		13204	1.32
Geocatalogo Bolzano		12952	1.3
Geocatalogo Bolzano		12663	1.27
Geocatalogo Bolzano		12598	1.26
Geocatalogo Bolzano		11693	1.17
Geocatalogo Bolzano		11639	1.16
Geocatalogo Bolzano		10157	1.02
Geocatalogo Bolzano		7790	0.78
Geocatalogo Bolzano		6824	0.68
Geocatalogo Bolzano		6077	0.61
Geocatalogo Bolzano		4103	0.41
Geocatalogo Bolzano		4036	0.4
Geocatalogo Bolzano		1423	0.14
Geocatalogo Bolzano		1304	0.13
Geocatalogo Bolzano		1331	0.13
Geocatalogo Bolzano		942	0.09
Geocatalogo Bolzano - Martinelli <i>et al.</i>		37682	3.77
Geocatalogo Bolzano - Martinelli <i>et al.</i>		26515	2.65
Geocatalogo Bolzano - Martinelli <i>et al.</i>		2403	0.24

(a)

Origine	Nome	Area [m2]	Area [ha]
Natura2000_Bolzano - Bragazza <i>et al.</i>	Biotopo Torbiera Wöfl	101618	10.16
Natura2000_Bolzano	Biotopo Torbiera Totes Moos	42124	4.21
Natura2000_Bolzano	Biotopo Torbiera Tschingger	13585	1.36
Natura2000_Trento		29710	2.97
Natura2000_Trento	Palù Tremole	22946	2.29
Natura2000_Trento		22378	2.24
Natura2000_Trento	Palù Longia	21427	2.14
Natura2000_Trento		19479	1.95
Natura2000_Trento		17986	1.8
Natura2000_Trento		17394	1.74
Natura2000_Trento		14446	1.44
Natura2000_Trento		13792	1.38
Natura2000_Trento		13226	1.32
Natura2000_Trento		12940	1.29
Natura2000_Trento		10666	1.07
Natura2000_Trento		9346	0.93
Natura2000_Trento		7355	0.74
Natura2000_Trento		6745	0.67
Natura2000_Trento		4898	0.49
Natura2000_Trento		4758	0.48
Natura2000_Trento - Spitale		11337	1.13
Natura2000_Trento - Spitale		208079	20.81
Natura2000_Trento - Spitale		47654	4.77
Natura2000_Trento - Spitale		35555	3.56
Natura2000_Trento - Spitale		28341	2.83
Natura2000_Trento - Spitale		27224	2.72
Natura2000_Trento - Spitale		26256	2.63
Natura2000_Trento - Spitale		22614	2.26
Natura2000_Trento - Spitale		18788	1.88
Natura2000_Trento - Spitale		15650	1.57
Natura2000_Trento - Spitale		12680	1.27
Natura2000_Trento - Spitale		11977	1.2
Natura2000_Trento - Spitale		10614	1.06
Natura2000_Trento - Spitale		10030	1
Natura2000_Trento - Spitale		7810	0.78
Natura2000_Trento - Spitale		4025	0.4

(b)

Tabella 3.1: (a); (b) tabella attributi con dettaglio su origine, nome e superficie (m² – ha) delle 71 torbiere digitalizzate – QGIS.