



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI ED AMBIENTALI (L-25)

L'ANALISI FUNZIONALE DELLE SERIE
TEMPORALI LANDSAT 8 PER LA
CLASSIFICAZIONE DELLA
VEGETAZIONE

The functional analysis of Landsat 8 time series for the
classification of vegetation

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
SOFIA VIGNOLI

Relatore:
DOTT. SIMONE PESARESI

Correlatore:
PROF.SSA SIMONA CASAVECCHIA

Correlatore:
DOTT. ADRIANO MANCINI

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Alla mia famiglia e ai miei nonni, a Christian e ai miei amici, per aver sempre creduto in me e per avermi supportata in questo percorso.
Alle mie compagne di corso Debora, Eleonora, Ilaria e Serena, con cui ho condiviso ogni singolo momento, conservandone il ricordo e senza le quali non avrei raggiunto questo traguardo.

SOMMARIO

ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
ACRONIMI E ABBREVIAZIONI	9
1 INTRODUZIONE	10
2 OBIETTIVI.....	12
3 MATERIALI E METODI.....	13
3.1 Area di studio.....	13
3.1.1 Aspetti climatici: precipitazioni e temperature	16
3.1.2 Aspetti geologici e geomorfologici	17
3.2 Reference Data.....	18
3.3 Serie temporali Landsat 8	22
3.3.1 Caratteristiche delle Landsat 8	22
3.3.2 Collezionamento e preprocessamento delle immagini satellitari Landsat 8 ..	23
3.3.3 Creazione delle serie temporali Landsat 8 delle singole bande e degli indici	25
3.4 Selezione delle migliori serie temporali (Supervised Mapping con strategia Forward Selection).....	27
3.4.1 FPCA e MFPCA	27
3.4.2 Random Forest (RF).....	29
3.4.3 Linear Discriminant Analysis (LDA).....	29
3.4.4 Forward Selection	30
3.4.5 Accuratezza della mappatura (Ten Fold Cross Validation)	30
4 RISULTATI E DISCUSSIONI:	32
4.1 Forward Selection.....	32
4.2 Classificazione supervised delle serie temporali selezionate.....	35
5 CONCLUSIONI	40
6 APPENDICE	42

7 BIBLIOGRAFIA 47

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 3-1: Piovosità medie mensili e giorni piovosi per la stazione di “Valmontagnana”.	16
Tabella 3-2: Temperature medie mensili per la stazione di “Valmontagnana”.	16
Tabella 3-3: Le principali associazioni vegetali presenti nell’area di Valmontagnana.....	18
Tabella 3-4: Confronto tra bande spettrali e risoluzioni spaziali del Landsat 7 ETM+ e del Landsat 8 OLI and TIRS.	23
Tabella 4-1: Risultati ottenuti con la Forward Selection.	32
Tabella 4-2: Le 6 migliori serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F03, standardizzate e classificatore LDA.....	33
Tabella 4-3: Matrice di confusione o di errore delle F03.....	35
Tabella 4-4: Parametri riferiti alla matrice di confusione o di errore delle F03.....	35
Tabella 4-5: Matrice di confusione o di errore delle F03 con la topografia.....	36
Tabella 4-6: Parametri riferiti alla matrice di confusione o di errore delle F03 con la topografia.	36
Tabella 6-1: Matrice di confusione o di errore delle F00-01-03.	42
Tabella 6-2: Parametri riferiti alla matrice di confusione o di errore delle F00-01-03.	42
Tabella 6-3: Matrice di confusione o di errore delle F00-01-03 con topografia.....	42
Tabella 6-4: Parametri riferiti alla matrice di confusione o di errore delle F00-01-03 con la topografia.	43

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 3-1: Parete del Monte di Valmontagnana. La foto è stata scattata durante un'escursione in loco il 5 novembre 2021.	13
Figura 3-2: Rete Natura 2000 Marche. In verde sono rappresentate le Aree protette, in rosso le aree SIC (Siti di Importanza Comunitaria) e in blu le ZPS (Zone di Protezione Speciale).	14
Figura 3-3: La diversità fenologica delle fitocenosi forestali presenti nel Parco Naturale Regionale della Gola della Rossa e di Frasassi tra la stagione primaverile (3 maggio 2019) e quella autunnale (5 novembre 2021). In quest'ultimo periodo, i boschi a dominanza di caducifoglie si riconoscono per le particolari colorazioni che assumono a differenza dei rimboschimenti e delle leccete sempreverdi.	15
Figura 3-4: Diagramma di Bagnouls e Gausсен (semplificato) per la stazione di "Valmontagnana".....	17
Figura 3-5: Carta litologica della ZSC "Gola di Frasassi" derivata da Costanzi et al., (2018).	18
Figura 3-6: Landsat 8 in orbita scattata il 13 aprile 2016.	22
Figura 3-7: A sinistra abbiamo la scena originale Landsat 8 del 25 luglio 2018 della ZSC in cui sono presenti nuvole e ombre di nuvole, le quali invece al centro sono delimitate da poligoni creati in QGIS. Infine, a destra l'immagine che risulta mascherata.	24
Figura 3-8: Effetto della topografia sulla riflettanza (Riano, et al., 2003).	25
Figura 3-9: A sinistra, una serie temporale con la singola banda 05 (NIR), molto utilizzata per creare indici. Al centro una serie temporale con formula F01 e a destra con formula F03 combinando le bande 05 (NIR) e 04 (RED).	26
Figura 3-10: A sinistra abbiamo la FPCA della serie temporale L03_03_02_00_00_30_BIL mentre al centro e a destra la prima e seconda componente.	28
Figura 3-11: Pattern spaziale della prima componente della serie temporale L03_03_02_00_00_30_BIL.	28
Figura 4-1: Confronto visivo tra la mappa ottenuta dalle Landsat (a sinistra) e la mappa prodotta con le Sentinel-2 (a destra). Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-	

Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R-Rimboschimento; S-Ripariale e U-Urbani. 37

Figura 4-2: Profili temporali medi delle categorie vegetazionali mappate nelle 6 serie temporali selezionate, non standardizzate e decomposte dalla MFPCA in F03 con LDA. Nelle colonne abbiamo le 6 serie temporali, mentre sulle righe le associazioni vegetali, nel seguente ordine: L-Lecceta; Q-Querceto; O-Ostrieto; R-Rimboschimento; S-Ripariale; G-Ginestreto; J-Ginepreto; P-Prateria; M-Mosaico; C-Coltivi; U-Urbani. 38

Figura 4-3: Profili temporali medi delle categorie vegetazionali mappate nelle 6 serie temporali selezionate, standardizzate e decomposte dalla MFPCA ottenendo la migliore accuratezza in F03 con LDA. Nelle colonne abbiamo le 6 serie temporali, mentre sulle righe le associazioni vegetali, nel seguente ordine: L-Lecceta; Q-Querceto; O-Ostrieto; R-Rimboschimento; S-Ripariale; G-Ginestreto; J-Ginepreto; P-Prateria; M-Mosaico; C-Coltivi; U-Urbani. 39

Figura 5-1: Monte Frasassi. La foto è stata scattata durante un'escursione in loco il 5 novembre 2021..... 41

Figura 6-1: Mappa della vegetazione del Sito della Gola di Frasassi "IT5320003" derivante dalla classificazione Supervised delle 6 serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F03 e con classificatore LDA. Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R-Rimboschimento; S-Ripariale e U-Urbani. 43

Figura 6-2: Mappa della vegetazione del Sito della Gola di Frasassi "IT5320003" derivante dalla classificazione Supervised delle 6 serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F03 a cui è stata aggiunta la topografia e con classificatore LDA. Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R-Rimboschimento; S-Ripariale e U-Urbani. 44

Figura 6-3: Mappa della vegetazione del Sito della Gola di Frasassi "IT5320003" derivante dalla classificazione Supervised delle 12 serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F00-01-03 e con classificatore LDA. Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R-Rimboschimento; S-Ripariale e U-Urbani. 45

Figura 6-4: Mappa della vegetazione del Sito della Gola di Frasassi "IT5320003" derivante dalla classificazione Supervised delle 12 serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F00-01-03 a cui è stata aggiunta la topografia e con classificatore LDA. Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-

Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R- Rimboscimento; S-Ripariale e U-Urbani.
..... 46

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

FPCA	FUNCTIONAL PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS
GNDVI	GREEN NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX
LDA	LINEAR DISCRIMINANT ANALYSIS
MFPCA	MULTIDIMENSIONAL FUNCTIONAL PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS
NDVI	NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX
RF	RANDOM FOREST
RI	REDNESS INDEX
ZSC	ZONA SPECIALE DI CONSERVAZIONE

1 INTRODUZIONE

Le mappature della vegetazione sono uno strumento utile ed efficace per la pianificazione, gestione, conservazione e monitoraggio di un territorio ed in particolare della biodiversità o diversità vegetale che lo caratterizza e di come questa sia organizzata nello spazio (Quattrini, et al., 2017). Le prime produzioni risalgono sin dalla seconda metà del diciannovesimo secolo e grande impulso e sviluppo hanno avuto negli ultimi decenni per l'applicazione della fitosociologia all'analisi della vegetazione, in particolare quella legata allo studio delle associazioni vegetali (Pedrotti, 2014). Le associazioni vegetali sono una combinazione di specie (assemblaggio di specie) che si ripete statisticamente nello spazio in risposta ai diversi fattori ambientali e pertanto con una propria caratterizzazione ecologica e biogeografica (Biondi, 2011). Gli avvenimenti e gli orientamenti scientifici di questi decenni sono stati fondamentali per una riflessione sulla produzione di mappe della vegetazione, sia a scopo teorico che applicativo e, probabilmente, possono essere d'aiuto nella previsione di possibili scenari evolutivi nell'ambito dell'attuale ricerca paesaggistica (Bruno, et al., 2003). La maggior parte delle mappe fitosociologiche (associazioni vegetali) utilizzate fino ad oggi, sono state realizzate con l'approccio definito "tradizionale" esperto che prevede, in un primo momento, la raccolta e la classificazione dei dati in campo, attraverso rilievi fitosociologici mentre, in un secondo momento, l'interpretazione visiva e la spazializzazione di foto aeree od ortofoto. Si tratta di un approccio che presenta diversi limiti in quanto non fornisce un'accuratezza della mappatura per cui, per averne una stima, è necessario tornare in campo e questo comporta un aumento dei costi ed una protrazione delle tempistiche di realizzazione. Inoltre, la procedura di interpretazione non è standardizzata e di conseguenza non ripetibile. Queste sono alcune delle ragioni per cui difficilmente le mappe vengono aggiornate.

Il recente sviluppo di nuove tecniche in ambito di telerilevamento ha fornito un supporto notevole per le applicazioni ecologiche, tra cui proprio la realizzazione di mappe della vegetazione e la valutazione delle dinamiche fenologiche di vari tipi di vegetazione inseriti anche in contesti che a livello europeo sono riconosciuti dalla Direttiva Habitat (92/43/CEE). Tali tecniche consistono nella raccolta di dati acquisiti da immagini satellitari, per gran parte dei casi disponibili gratuitamente, che permettono di stimare e monitorare la vegetazione su

ampia scala, dimostrando di essere strumenti potenti ed economici (Matongera, et al., 2021). La Direttiva Habitat (92/43/CEE), a cui si fa riferimento, riguarda un programma europeo il cui scopo è “salvaguardare la biodiversità mediante la conservazione degli habitat naturali e seminaturali, nonché della flora e della fauna selvatiche nel territorio europeo degli Stati membri alle quali si applica il trattato” (art.2). Per il raggiungimento di tale obiettivo la Direttiva stabilisce misure volte ad assicurare il mantenimento o il ripristino, in uno stato di conservazione soddisfacente, degli habitat e delle specie di interesse comunitario (Ministero della Transizione Ecologica, 2021).

Con il lavoro di questa tesi, tenendo conto di quanto è stato finora trattato in quelle precedenti, che hanno riguardato la stessa tematica, si è voluto ulteriormente sviluppare e sperimentare la metodologia di mappatura della vegetazione in quanto si è osservato che potenzialmente si sarebbero potuti superare determinati limiti, con l'intento di migliorare l'utilizzo di tale importante strumento di rilevazione, così da tutelare, preservare e salvaguardare in maniera sempre più accurata il territorio ed il patrimonio forestale ed ambientale.

Il percorso metodologico è iniziato partendo dalla tesi di (Quattrini, et al., 2017) in cui è stata adottata la “Functional Principal Component Analysis” (FPCA) come tecnica per l'analisi funzionale delle serie temporali NDVI da cui estrarre le principali modalità di variazione fenologiche. Nelle tesi di (Forconi, et al., 2020; Colavito, et al., 2020; Deplano, et al., 2020), è stata introdotta la “Multidimensional - FPCA” (MFPCA) che ha permesso di analizzare contemporaneamente più serie temporali ma, anche in questo caso, il limite che ne è derivato, riguardava la difficile interpretazione di un numero così elevato di serie temporali. Per migliorare questo aspetto, in questa tesi, viene proposta la strategia di “Forward Selection” che ha la capacità di selezionare poche serie temporali combinando FPCA e MFPCA insieme. Inoltre, sempre con questa innovativa strategia, è stato possibile mettere a confronto due diverse tipologie di classificatori: il *Random Forest* (RF) ed il *Linear Discriminant Analysis* (LDA).

Infine, poiché il satellite Sentinel-2 è stato già esplorato in tutta la sua risoluzione spettrale per l'acquisizione di immagini da cui ricavare le serie temporali, mentre il Landsat 8 finora era stato utilizzato solo per calcolare le serie temporali NDVI, questo lavoro è stata l'occasione per mettere alla prova il Landsat 8, anche facendo uso della banda termica di cui è dotato, per andare a scoprire cosa di nuovo ci potesse “raccontare”.

2 OBIETTIVI

Questa tesi si pone come obiettivo principale quello di realizzare mappe delle associazioni vegetali e degli habitat (*sensu* Direttiva 92/43/CEE) della ZSC “Gola di Frasassi” IT 5320003 applicando la metodologia di mappatura sviluppata in (Pesaresi, et al., 2020; Costanzi, et al., 2019; Quattrini, et al., 2020), basata sull’analisi funzionale delle serie temporali delle immagini satellitari, focalizzando l’attenzione sull’utilizzo di nuove tecniche e sperimentandone altre, già note, così da sfruttare potenzialità non ancora prese in considerazione.

In sintesi, il percorso di sviluppo metodologico di mappatura che è stato seguito per raggiungere tale obiettivo è stato il seguente: (i) creazione delle serie temporali di singole bande ed indici estratti dalle immagini Landsat 8 sia normalizzate topograficamente che non, usandole in tutta la loro risoluzione spettrale; (ii) selezione delle migliori serie temporali tramite l’introduzione della procedura di *Forward Selection* che combina la *Functional Principal Component Analysis* (FPCA) con la *Multidimensional- Functional Principal Component Analysis* (MFPCA) che mette a confronto due diverse tipologie di classificatori che sono il *Linear Discriminant Analysis* (LDA) e il *Random Forest* (RF); (iii) valutazione del comportamento e dell’eventuale contributo nei confronti della vegetazione che può fornire la banda termica, utile a stimare le temperature in °C delle superfici (iv) mappatura delle associazioni vegetali e degli habitat mediante classificazione *supervised* delle migliori serie temporali indicate dalla procedura sopracitata con il classificatore più performante. Infine, confronto tra le varie mappe Landsat 8 prodotte con quella Sentinel-2 ottenuta nell’articolo di (Pesaresi, et al., s.d.).

3 MATERIALI E METODI

3.1 Area di studio

Lo studio della Zona Speciale di Conservazione (ZSC) “Gola di Frasassi” IT5320003 nasce dall’esigenza di valutare l’affidabilità della metodologia sperimentata e di soddisfare gli obiettivi prefissati. La Zona si estende su di un’area di 728 ha, completamente immersi nel Parco Naturale Regionale della Gola della Rossa e di Frasassi istituito nel settembre del 1997, in base alla L.R. n. 57 del 02.09.1997 (Consiglio regionale delle Marche, 1997), nella provincia di Ancona, amministrato dai comuni di Genga e Fabriano.



Figura 3-1: Parete del Monte di Valmontagnana. La foto è stata scattata durante un’escursione in loco il 5 novembre 2021.

Tale area fa parte interamente della Zona di Protezione Speciale IT5320017 “Gola della Rossa e di Frasassi” ed è delimitata a Nord dai rilievi di Monte la Croce e Monte Ginguno, ad Est dalla strada Provinciale che collega la località Pierosara con San Vittore, a Sud da Valtreara-Valmontagnana-Monte Civitella e ad Ovest dal nucleo abitato di Spineto e dall’area industriale di Pianello. La quota massima della Zona è di 931 metri del Monte di Valmontagnana mentre quella minima è di 200 metri, al limite con la sponda sinistra del fiume Esino, al confine est dell’area e che prosegue prima fino al bivio per Genga stazione e poi lungo la strada comunale per Pierosara che costituisce il limite orientale della Zona (D.R.E.Am.italia, 2015).

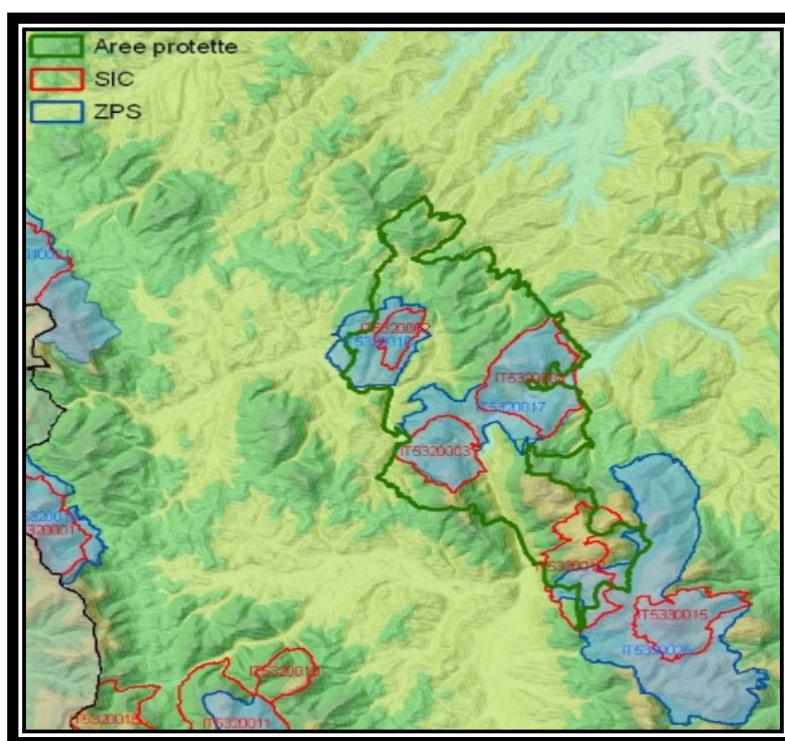


Figura 3-2: Rete Natura 2000 Marche. In verde sono rappresentate le Aree protette, in rosso le aree SIC (Siti di Importanza Comunitaria) e in blu le ZPS (Zone di Protezione Speciale).

Al suo interno, sono racchiuse un numero considerevole di specie floristiche e faunistiche, dovuto principalmente alla variabilità topografica e litologica del territorio stesso. A tal proposito la Gola di Frasassi è caratterizzata dalla presenza di un tipo di roccia permeabile, denominata Calcarea massiccio, sulla quale i movimenti geologici, dai quali si è generata la catena appenninica, hanno lasciato segni evidenti e visibili dai monti Valmontagnana e

Ginguno tra i quali la gola si snoda. Di notevole importanza sono i fenomeni carsici che interessano l'area e che hanno dato origine al complesso ipogeo delle Grotte di Frasassi (Rete Natura 2000 Marche, 2016).



Figura 3-3: La diversità fenologica delle fitocenosi forestali presenti nel Parco Naturale Regionale della Gola della Rossa e di Frasassi tra la stagione primaverile (3 maggio 2019) e quella autunnale (5 novembre 2021). In quest'ultimo periodo, i boschi a dominanza di caducifoglie si riconoscono per le particolari colorazioni che assumono a differenza dei rimboschimenti e delle leccete sempreverdi.

3.1.1 Aspetti climatici: precipitazioni e temperature

Secondo la classificazione bioclimatica di Rivas-Martinez (Rivas-Martínez, et al., 2011), l'area oggetto di studio appartiene al macrobioclima temperato, nella variante submediterranea, caratterizzato da un periodo di aridità estiva relativamente breve.

Per i dati pluviometrici è stata presa in considerazione la stazione di Valmontagnana e qui di seguito viene illustrata una tabella in cui vengono riportate sia le precipitazioni medie mensili che il numero di giorni piovosi, di cui sono disponibili 17 anni di osservazione.

Tabella 3-1: Piovosità medie mensili e giorni piovosi per la stazione di "Valmontagnana".

	Gen.	Feb.	Mar	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago	Set	Ott.	Nov.	Dic.	Anno
mm pioggia	90	112	84	93	109	68	47	48	95	136	131	119	1132
gg. piov	10	9	10	9	11	6	4	5	7	10	11	12	104

Analizzando la tabella si può notare che la precipitazione media annua è pari a 1.132 mm. Per quanto riguarda invece la distribuzione mensile delle piogge, nel mese di ottobre si raggiunge il massimo assoluto autunnale (136 mm) mentre il minimo estivo, nei mesi di luglio (47 mm) e di agosto (48 mm). Nel periodo primaverile i valori rimangono pressoché costanti. Si può dedurre quindi che, nel periodo autunnale e primaverile la piovosità è relativamente elevata a differenza di quello estivo. Per le temperature invece, poiché la stazione di Valmontagnana non dispone di dati termometrici, è stato necessario ricorrere ai dati registrati dalla vicina stazione di Fabriano. La temperatura media annua è pari a 12,1 °C. Il mese più caldo è quello di luglio, condizione ricorrente per le stazioni continentali marchigiane, mentre quello più freddo è gennaio, seguito da dicembre e febbraio. Le temperature tendono ad aumentare con regolarità nella prima parte dell'anno decrescendo poi nella seconda anche se, attraverso un loro confronto, è emerso che proprio in questa seconda parte, risultano essere più calde rispetto alla prima, fenomeno tipico di stazioni con caratteri di mediterraneità, dovuto all'effetto volano del mare che "prolunga" la stagione estiva verso l'inverno ed è un carattere che singolarmente ritroviamo nella maggior parte delle stazioni dell'Italia Centro-Settentrionale.

Tabella 3-2: Temperature medie mensili per la stazione di "Valmontagnana".

Gen.	Feb.	Mar	Apr.	Mag.	Giu.	Lug.	Ago	Set	Ott.	Nov.	Dic	Anno
2,8	3,7	6,8	10,7	14,5	19,2	21,9	21,6	18,1	13,0	8,3	4,5	12,1

Il diagramma di Bagnouls e Gaussen ha permesso di mettere a confronto sia le temperature, riportate in scala doppia, che la piovosità. In quei casi in cui la curva delle precipitazioni si dovesse trovare al di sotto di quella delle temperature, ovvero quando il rapporto ($P/2T$) è uguale o inferiore a 1, il periodo interessato viene definito arido. L'aridità rappresenta un fattore ecologico determinante per la vegetazione. Nel caso di Valmontagnana non esiste un periodo di aridità significativa, anche se questo si potrebbe verificare nelle annate più siccitose.

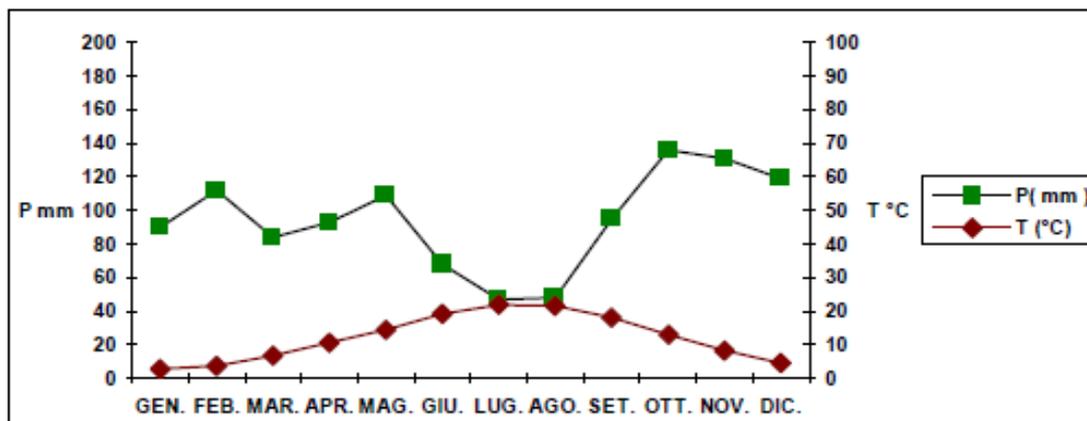


Figura 3-4: Diagramma di Bagnouls e Gaussen (semplificato) per la stazione di “Valmontagnana”.

3.1.2 Aspetti geologici e geomorfologici

A livello geologico e geomorfologico, l'area di studio è interessata perlopiù dalla presenza di litotipi calcarei, appartenenti alla successione Umbro-Marchigiana, quali il “Calcarea massiccio” che risulta essere la formazione più antica che affiora, seguita dalla “Maiolica”, dalla “Scaglia bianca” e dalle “Marne” che si sono via via formati, a partire dal periodo Triassico superiore fino al Neogene. I “Depositi di falda” invece sono di più recente formazione e risalgono al periodo Olocene e Pleistocene.

La Zona considerata, si sviluppa da Nord/Nord Ovest a Sud/ Sud Est sulla cosiddetta “dorsale marchigiana” che insieme alla parallela “dorsale umbro-marchigiana” e alla depressione che le divide detta “sinclinorio camertino” con le dorsali minori, costituisce una parte del sistema appenninico della Regione Marche. Dal punto di vista della morfologia, la dorsale marchigiana presenta ripidi versanti, la cui pendenza varia in relazione alla strutturazione idrografica, con frequenti salti rocciosi anche di notevole imponenza ed aree prive di vegetazione. La fascia orientale invece è caratterizzata da un paesaggio molto più dolce, costituito da un'ampia zona collinare che degrada dolcemente verso il mare.

Nell’ambito della zona di indagine prevalgono le superfici con pendenza maggiore del 50% (D.R.E.Am.italia, 2015).

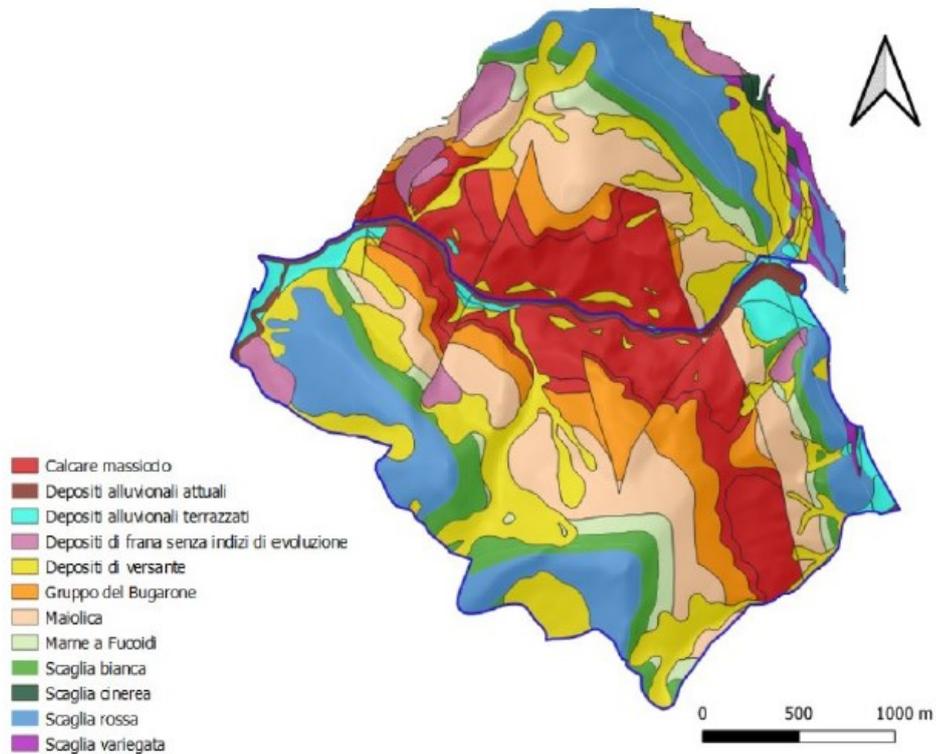


Figura 3-5: Carta litologica della ZSC “Gola di Frasassi” derivata da Costanzi et al., (2018).

3.2 Reference Data

In base alla carta della vegetazione e degli habitat (*sensu* Direttiva 92/43/CEE) (Biondi, et al., 2009) e facendo riferimento ai precedenti lavori di tesi magistrale di Costanzi Valentina (Costanzi, et al., 2019) e di Quattrini Giacomo (Quattrini, et al., 2020) nonché all’articolo attualmente in attesa di pubblicazione di Pesaresi, Mancini, Quattrini e Casavecchia (Pesaresi, et al., s.d.) relativi all’area di Valmontagnana, vengono riportate di seguito, in sintesi, le principali associazioni vegetali.

Tabella 3-3: Le principali associazioni vegetali presenti nell’area di Valmontagnana.

<i>Label</i>	<i>Associazioni vegetali</i>	<i>Descrizione</i>
--------------	------------------------------	--------------------

Q	Boschi di roverella (<i>Quercus pubescens</i>)	Queste formazioni a dominanza di roverella che si rinvenivano nell'area di studio, appartengono all'habitat 91AA*- "Boschi orientali di quercia bianca". Nelle zone più interne, poggiano principalmente su terreni poveri, erosi e sassosi, dando vita a formazioni aperte costituite da diverse specie erbacee ed arbustive (Pesaresi, et al., s.d.). Dal punto di vista fitosociologico, fanno riferimento all'associazione <i>Cytiso sessilifolii-Quercetum pubescentis</i> .
O	Boschi di carpino nero (<i>Ostrya carpinifolia</i>)	Identificabili nell'associazione <i>Scutellario columne-Ostryetum carpinifoliae</i> , sono boschi che presentano un'ampia valenza ecologica grazie alla quale riescono a colonizzare ambienti notevolmente diversi assumendo particolari aspetti riferibili a sub-associazioni (Biondi, et al., 2010). Non sono però riconosciuti come habitat dalla Direttiva Europea.
R	Rimboschimenti	Presenti in tutta l'area di studio ed effettuati a partire dalla seconda metà del secolo scorso, gli impianti sono stati eseguiti perlopiù con resinose quali: <i>Pinus nigra</i> , <i>Pinus pinaster</i> , <i>Pinus pinea</i> , <i>Pinus halepensis</i> , <i>Abies alba</i> e <i>Cupressus sempervirens</i> .
S	Formazioni ripariali	Lungo le sponde del fiume Sentino, che scorre nella Gola, troviamo principalmente salice bianco (dell'associazione <i>Rubus ulmifolii-Salicetum albae</i>) mentre il pioppo nero (<i>Salici-Populetum nigrae</i>) è presente nei terrazzamenti sovrastanti. Queste formazioni sono riconducibili all'habitat 92A0- "Foreste a galleria di <i>Salix alba</i> e <i>Populus alba</i> " (Biondi, et al., 2007).
		Le leccete, presenti nella Zona, sono inserite all'interno dell'habitat 9340 - "Foreste di <i>Quercus</i>

L	Boschi di leccio (<i>Quercus ilex</i> e <i>Quercus rotundifolia</i>)	<i>ilex</i> e <i>Quercus rotundifolia</i> ". Questi boschi si differenziano da quelli costieri o subcostieri poiché nello strato arboreo sono presenti perlopiù specie decidue mentre nel sottobosco troviamo maggiormente specie mesofile, provenienti dai vicini boschi di latifoglie, a discapito di quelle termofile le quali, non sopportano le condizioni imposte dalla stagione invernale (Pesaresi, et al., s.d.). Pertanto, vengono classificati nell'associazione vegetale <i>Cephalanthero longifoliae-Quercetum ilicis</i> che rappresenta una delle formazioni più mesofile, diffuse in tutta la zona ed in particolare lungo le pareti rocciose della Gola (Biondi, et al., 2007).
J e G	Arbusteti	Sono presenti in tutta l'area di studio ed in particolare su praterie abbandonate in cui è in corso la ricolonizzazione del bosco. Nei suoli più profondi la principale specie è <i>Spartium junceum</i> e in numero minore il <i>Cytisus sessilifolius</i> . Queste formazioni di ginestra appartengono all'associazione vegetale <i>Spartio juncei-Cytisetum sessilifolii</i> . Al contrario, su suoli meno profondi e poveri, domina invece la specie <i>Juniperus oxycedrus</i> che rientra sempre nell'associazione sopraccitata nella var. <i>Juniperus oxycedrus</i> (Pesaresi, et al., s.d.).
P	Praterie	Le praterie, di origine secondaria, non sono molto diffuse nella zona e si trovano principalmente sulla sommità del monte Valmontagnana, dove il pascolo è ancora praticato. Per gran parte si tratta di prati radi e aridi a causa dell'eccessiva pietrosità del substrato e della ridotta profondità del suolo (Pesaresi, et al., s.d.). L'associazione di riferimento è <i>Asperulo purpurea-Brometum erecti</i> che

		costituisce l'habitat prioritario 6210*- "Formazioni erbose secche seminaturali e facies coperte da cespugli su substrato calcareo (<i>Festuco-Brometalia</i>) (notevole fioritura di Orchidee)" (Biondi, et al., 2009).
M	Mosaico	È rappresentato da garighe, vegetazione di roccia e ghiaioni. Nelle garighe è presente l'associazione <i>Cephalario leucanthae – Saturejetum montanae</i> . Nelle radure invece possiamo trovare gli habitat 6110* – "Formazioni erbose rupicole calcicole o basofile dell'Alyso-Sedion albi" e 6220* - "Percorsi substeppici di graminacee e piante annue dei <i>Thero Brachypodietea</i> ". Lungo le pareti rocciose della Gola, la vegetazione casmofitica presente appartiene all'associazione <i>Moehringio papulosae – Potentilletum caulescentis</i> e all'habitat 8210 – "Pareti rocciose calcaree con vegetazione casmofitica" (Pesaresi, et al., s.d.).

Oltre alle associazioni vegetali presentate nella Tabella 3-3, sono state considerate tipologie quali i coltivi (C) rappresentati soprattutto da colture cerealicole e l'urbano (U) dato da case ed area industriale presenti nella Zona.

3.3 Serie temporali Landsat 8

3.3.1 Caratteristiche delle Landsat 8

Le immagini satellitari che sono state prese in esame sono state acquisite dal satellite di tipo Landsat 8, appartenente al programma americano Landsat ed operativo dal febbraio del 2013. È dotato di due sensori: l'Operational Land Imager (OLI) ed il Thermal InfraRed Sensor (TIRS).

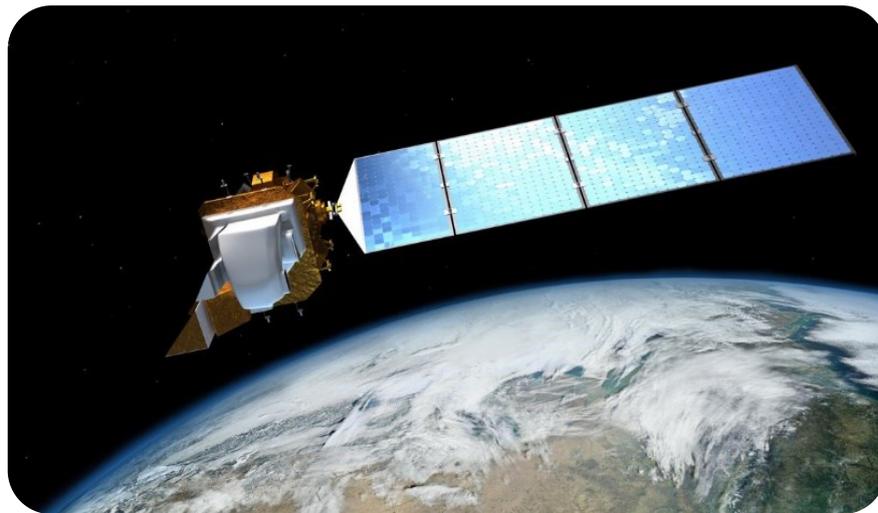


Figura 3-6: Landsat 8 in orbita scattata il 13 aprile 2016.

Le bande spettrali che presenta il Landsat 8 sono ben undici. Di queste, il sensore OLI raccoglie i dati per le prime nove, due delle quali rappresentano una novità rispetto alla precedente missione Landsat 7. Si tratta per l'appunto di una banda costiera/aerosol (banda 1), per l'osservazione della zona costiera ed una banda cirri (banda 9) per rilevare la copertura nuvolosa. Il sensore TIRS invece raccoglie dati per due bande che operano nella regione del termico e che stimano la temperatura in °C della superficie. In questo lavoro di tesi, verranno prese in considerazione tutte le bande eccetto la banda del pancromatico e la banda cirri che non verranno quindi analizzate. La risoluzione spaziale dei sensori è di 30 metri per la regione del visibile, dell'infrarosso vicino (NIR), dell'infrarosso medio (SWIR), 100 metri per il termico e 15 metri per il pancromatico. La risoluzione temporale, ovvero la frequenza con cui i satelliti "visitano" i territori, è di circa 16 giorni.

Tabella 3-4: Confronto tra bande spettrali e risoluzioni spaziali del Landsat 7 ETM+ e del Landsat 8 OLI and TIRS.

Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9

Rispetto alle precedenti serie di satelliti di tipo Landsat, grazie all'introduzione di questo nuovo sensore OLI, i dati vengono acquisiti con una migliore risoluzione radiometrica di 12 bit e non più di 8 bit. Si è passati quindi da un intervallo di valori di *density number* compreso tra 0 e 256 ad uno tra 0 e 4096, aumentando così il livello dei valori attribuiti a ciascun pixel (USGS science for changing world, 2017).

3.3.2 Collezionamento e preprocessing delle immagini satellitari Landsat 8

Attraverso l'utilizzo del portale dati dell'agenzia scientifica americana USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (USGS), è stato possibile collezionare 56 immagini satellitari Landsat 8 OLI/TIRS Collection 2 Level 2 già corrette atmosfericamente e geometricamente. Il periodo preso in considerazione, e per il quale risultavano disponibili le immagini, è stato dal 1° gennaio 2013, anno in cui è stata lanciata la missione Landsat 8, al 31 marzo 2021. La ricerca è stata quindi effettuata per mesi nell'arco dei diversi anni, a partire da gennaio fino a dicembre e le date di acquisizione delle immagini risulteranno poi utili per la costruzione delle serie temporali Landsat 8. Il criterio di scelta è stato quello di prendere quelle relative all'area oggetto di studio che non contenessero o che contenessero parzialmente al loro interno nuvole o ombre di nuvole proiettate sulla superficie terrestre al fine poi di poterle pre-processare ed analizzare.

Per ciascuna delle 56 immagini, ognuna contenente al suo interno 8 bande, è stato poi eseguito un ritaglio, utilizzando i limiti amministrativi della ZSC ‘Gola di Frasassi’ IT5320003. Successivamente è stato necessario riconvertire, mediante fattori di scala forniti dalla USGS e validi per i prodotti scientifici Landsat Collection 2 Level 2, i valori di riflettanza superficiale tra 0 e 1 per le bande dalla 1 alla 7 e di temperatura superficiale in gradi °Celsius per la banda 8 che corrisponde all’infrarosso termico (USGS science for a changing world, 2020). Inoltre, per alcune di esse, è stato opportuno, dopo un’accurata analisi visiva, ricorrere al processo di mascheramento che consiste nella rimozione di nuvole o ombre di nuvole presenti, operazione che, in questo caso, è stata effettuata manualmente con l’ausilio del software “QGIS 3.4 Madeira” (QGIS Development Team, 2019). Da questa operazione sono state ottenute nuove immagini “bucate” in cui i pixel che costituivano le nuvole (e ombre delle nuvole), sono stati esclusi, poiché anomali, dalle successive fasi di pre-processamento (Vedi Figura 3-7).

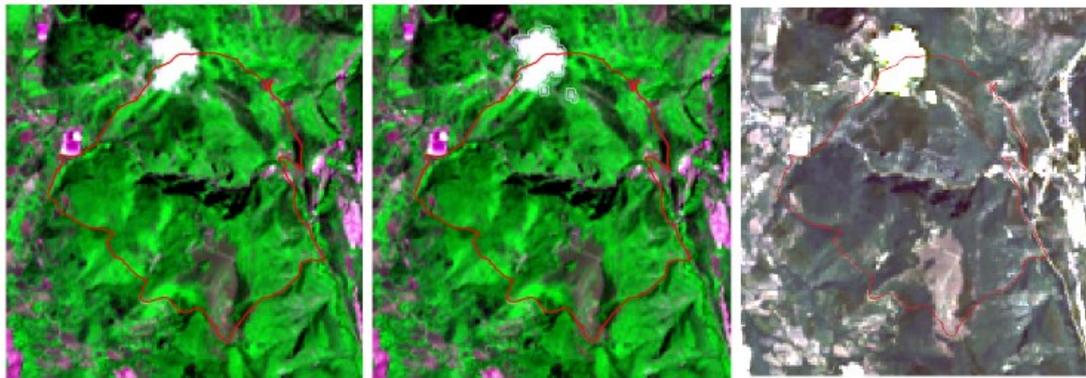


Figura 3-7: A sinistra abbiamo la scena originale Landsat 8 del 25 luglio 2018 della ZSC in cui sono presenti nuvole e ombre di nuvole, le quali invece al centro sono delimitate da poligoni creati in QGIS. Infine, a destra l’immagine che risulta mascherata.

In seguito al processo di mascheramento, si è passati alla procedura di co-registrazione che consiste nella sovrapposizione e allineamento delle immagini con una di riferimento detta target che nel nostro caso risaliva al 12 giugno 2020.

Prima di proseguire con la creazione delle serie temporali Landsat 8, si è ricorsi alla correzione o normalizzazione topografica che permette di compensare il differente livello di illuminazione solare, causato dall’irregolare conformazione del terreno, che ha determinato una variazione nella risposta spettrale per i diversi tipi di vegetazione simili: le aree

ombreggiate mostrano una riflettanza inferiore rispetto a quella prevista mentre nelle aree soleggiate l'effetto è contrario.

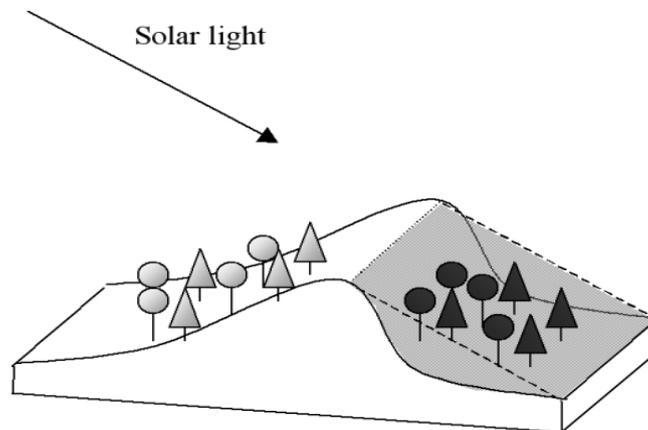


Figura 3-8: Effetto della topografia sulla riflettanza (Riano, et al., 2003).

Nel corso di questa procedura ci si è serviti di un Modello Digitale del Terreno (DEM) avente la stessa risoluzione delle immagini Landsat, che ha consentito all'algoritmo di normalizzazione topografica adottato, di mantenere al meglio le caratteristiche spettrali di ciascuna banda e di fornire la massima riduzione della variabilità delle diverse tipologie di vegetazione (Riano, et al., 2003).

Ciascuna fase del pre-processamento è stata realizzata tramite specifiche librerie del software "R" (R Core Team, 2019) quali il package "RStoolbox" (Leutner, et al., 2019) e "Raster" (Hijmans, et al., 2020).

3.3.3 Creazione delle serie temporali Landsat 8 delle singole bande e degli indici

La creazione delle serie temporali Landsat 8 è stata realizzata utilizzando sia le 56 immagini satellitari che risultavano in un primo momento soltanto mascherate e co-registrate, sia le stesse che sono state in seguito corrette o normalizzate topograficamente. In entrambi i casi si è partiti dall'estrazione delle singole bande di ciascuna immagine, dalle quali poi, tramite l'utilizzo di formule specifiche, è stato possibile calcolare gli indici di vegetazione. Queste operazioni di fondamentale importanza, ci permettono, insieme ai Reference Data di cui disponiamo, di valutare l'influenza che può aver avuto la correzione o normalizzazione topografica.

Dalle 56 immagini multibanda ne sono state generate altrettante monobanda, le cui date, riferite ad anni differenti, solo successivamente saranno riconvertite in settimane e bi-settimane per costruire le serie temporali.

Due sono state principalmente le formule utilizzate e che hanno coinvolto due bande alla volta tra quelle esaminate. La prima formula adottata è la F01 ed è data da $A-B$ mentre la formula F03 equivale a $(A-B) / (A+B)$. Entrambe, ripetute per 21 volte, sono state applicate a tutte le immagini ottenute nella precedente fase per ciascuna banda (Forconi, et al., 2020).

Successivamente i valori dei 9754 pixel delle immagini create, sono stati posti in ordine cronologico e rappresentati mediante la costruzione di serie temporali relative ad un unico anno, suddiviso in 26 bi-settimane, dapprima delle singole bande con formula F00 e poi degli indici o combinazioni fra bande con F01 e F03. Per ogni pixel viene così costruita una curva che è l'espressione della sua stagionalità e di cui conosciamo il valore o andamento medio di ogni banda o combinazione tra bande, di un preciso momento che tende a variare nelle 26 bi-settimane, secondo un ordine che ha permesso di costruire le serie temporali. Inoltre, è importante affermare che per alcuni di questi pixel, sappiamo quale tipologia di vegetazione è presente nel territorio. In questo lavoro di tesi, non verrà valutata la variazione dei valori tra anni differenti ma il valore medio di un singolo anno. I pixel ed i luoghi che descriviamo sono sempre gli stessi, ciò che cambiano sono i descrittori dei luoghi dati dalle bande spettrali.

Con la formula F00 sono state ottenute 7 serie temporali, una per ogni banda considerata, mentre per le F01 e le F03, ne sono state ottenute 21 poiché 21 erano le possibili combinazioni tra le stesse e le curve che ne derivano sono le variazioni delle formule applicate.

La realizzazione delle serie temporali è stata fatta tramite il software “R versione 3.6.0.” con i package “Lubridate” (Grolemund & Wickham, 2011), “RStoolbox” (Leutner, et al., 2019), “raster” (Hijmans, et al., 2020) e “mgvc” (Wood, 2016).

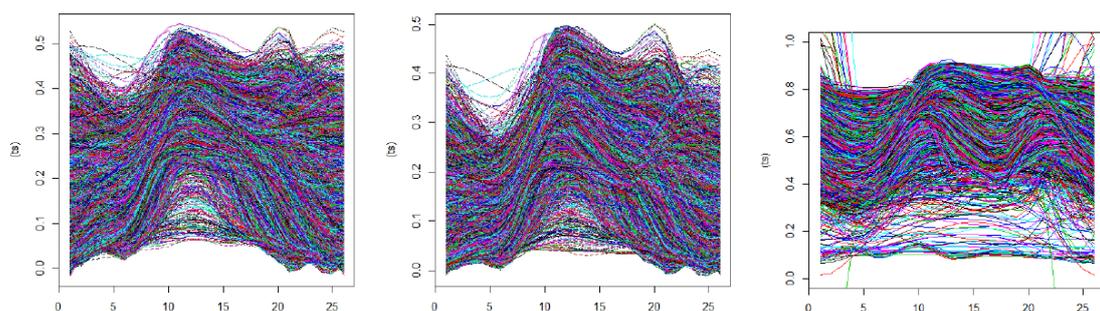


Figura 3-9: *A sinistra, una serie temporale con la singola banda 05 (NIR), molto utilizzata per creare indici. Al centro una serie temporale con formula F01 e a destra con formula F03 combinando le bande 05 (NIR) e 04 (RED).*

3.4 Selezione delle migliori serie temporali (Supervised Mapping con strategia Forward Selection)

Le serie temporali delle singole bande (F00) e degli indici (F01 e F03), ottenute sia dalle immagini mascherate e co-registrate che da quelle anche normalizzate topograficamente, sono state analizzate e decomposte con (*Multidimensional-*) *Functional Principal Component Analysis* (FPCA e MFPCA) e quindi sottoposte ad una *Supervised Mapping* con strategia *Forward Selection*, impiegando come algoritmi di classificazione il *Random Forest* (RF) e il *Linear Discriminant Analysis* (LDA), dapprima senza normalizzare le curve e poi normalizzandole. Entrambi sono capaci di selezionare le migliori serie temporali che meglio distinguono e descrivono le tipologie di vegetazione dell'area di studio sulla base di informazioni esterne, nel nostro caso rappresentate dai Reference data forniti, che istruiscono ciascun classificatore. Per questa ragione vengono anche chiamati "Machine Learning", il cui obiettivo è quello di costruire un modello conciso della distribuzione tra le classi in termini predittivi (Kotsiantis, 2007). In questo caso i classificatori vengono utilizzati per individuare uno o più andamenti o profili stagionali dei pixel delle categorie vegetazionali che conosciamo in modo tale da poter classificare i restanti.

In un secondo momento, si è deciso di eseguire la procedura di *Forward Selection*, mescolando tutte e tre le formule utilizzate usando sempre come classificatori RF e LDA.

3.4.1 FPCA e MFPCA

L'Analisi Funzionale delle Componenti Principali (FPCA), è un'evoluzione dell'Analisi delle Componenti Principali (PCA) ed è uno degli approcci più comunemente adottati per l'analisi dei dati funzionali e longitudinali a partire dalla loro osservazione su un generale dominio d-dimensionale. La FPCA considera ed analizza ciascuna curva di ogni pixel dell'area di studio, come un unico oggetto e non come una serie di valori discreti ed è capace di estrarre le principali modalità di variazione che vi sono tra tutte le curve, proiettandole su di un sistema ortogonale, permettendone così una rappresentazione su di un grafico di ridotte dimensioni. Il comportamento delle curve quindi si può scomporre in due o più componenti ortogonali tra loro che sommate ci danno il risultato finale e ci indicano le principali variazioni stagionali.

I principali risultati della FPCA sono gli "*eigenvalues*" che "misurano" la variazione spiegata da ogni dimensione e le "*eigenfunctions*" che mostrano le maggiori variazioni funzionali per ogni dimensione.

Gli "*scores*" o "*punteggi*" sono anch'essi dei prodotti di tipo quantitativo della FPCA che in maniera ordinata, sintetizzano e quantificano la somiglianza tra le curve in base a quanto le componenti le rappresentano che, a seconda degli "*scores*", nel nostro caso, sono state

tematizzate dal blu al rosso. Quest'ultimo viene quindi utilizzato per indicare "scores" con valori positivi o comunque maggiori durante tutto l'anno rispetto ad una media calcolata dalla FPCA riferita all'area di studio. Viceversa, il blu indica quegli "scores" con valori negativi o inferiori alla media.

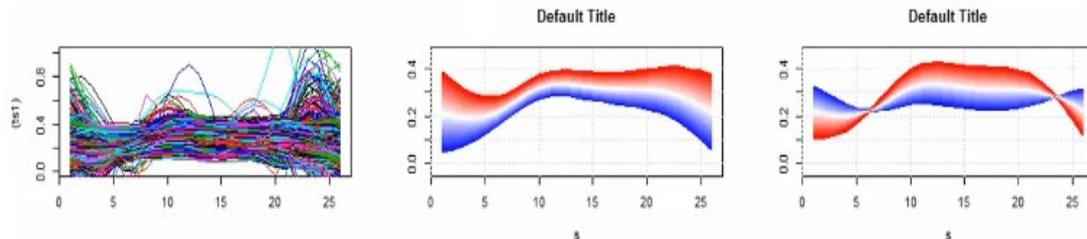


Figura 3-10: A sinistra abbiamo la FPCA della serie temporale L03_03_02_00_00_30_BIL mentre al centro e a destra la prima e seconda componente.

Se le componenti ci permettono di individuare le principali variazioni stagionali di tutte le curve, gli "scores" ci indicano quanto queste aderiscano o meno alle componenti, per poi essere ordinate sempre sulla base delle principali stagionalità presenti nel nostro dataset. Associando ai "punteggi" le rispettive coordinate, è possibile ottenere una loro mappatura e cioè rappresentare il loro pattern spaziale.

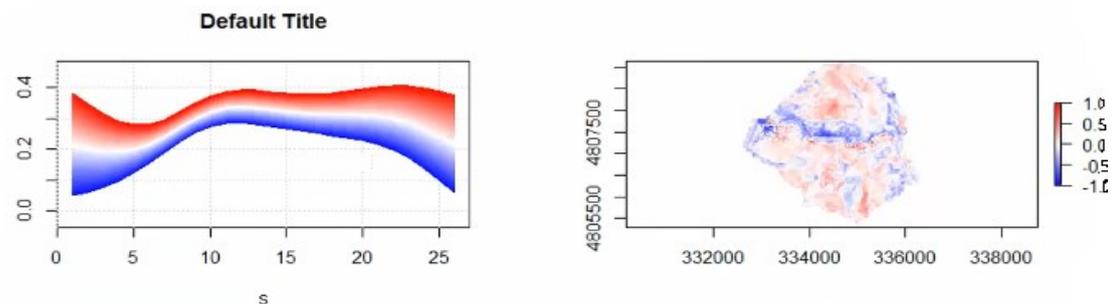


Figura 3-11: Pattern spaziale della prima componente della serie temporale L03_03_02_00_00_30_BIL.

Possiamo quindi proiettare nello spazio i comportamenti stagionali descritti da remoto. I pattern spaziali (componenti funzionali) così ottenuti (da FPCA o MFPCA) rappresentano i predittori (i cui valori saranno attribuiti al Reference Data) utilizzati dai classificatori LDA e RF. LDA o RF, infatti, cercheranno di capire quali sono i punteggi delle varie stagionalità o

componenti migliori per discriminare le nostre categorie, generando così un modello predittivo.

La FPCA unidimensionale permette di considerare una serie temporale alla volta e pertanto una serie di più FPCA può fornire una buona mappatura, ma ottenendo tanti spazi di ordinamento, si ottiene un risultato non sintetico (Quattrini, et al., 2020).

Recentemente la FPCA è stata estesa ad una versione multidimensionale detta MFPCA che permette di analizzare contemporaneamente più serie temporali da cui ricavare informazioni sulle stagionalità (Chen & Jiang, 2016). La MFPCA rappresenta un ottimo strumento di compressione delle serie temporali. Nel caso in cui le serie temporali sono numerose (es. nel nostro caso 7 serie temporali F00, 21 F01 e 21 F03) l'interpretazione delle componenti funzionali ottenute potrebbe risultare difficoltoso. Per questa ragione adottiamo la *Forward Selection* allo scopo di identificare poche serie temporali capaci di ottenere però la massima accuratezza nella classificazione.

3.4.2 *Random Forest (RF)*

L'algoritmo di *Random Forest* (RF) (Breiman, 2001) è uno dei metodi di classificazione e regressione più efficienti basato sui pixel e capace di fornire accuratezze elevate. È conosciuto anche come metodo di apprendimento automatico, non parametrico, le cui previsioni di classe si basano sull'aggregazione di più alberi decisionali non correlati (*ntree*). Quest'ultimi vengono creati da sottoinsiemi casuali del training data fornito, diverso dal dataset di partenza che ha il compito di guidare il classificatore nell'individuazione di possibili relazioni tra i dati per trovare poi il miglior modello che li rappresenti (Akar & Güngör, 2012). Una parte dei dati, quindi, non viene implicata nella costruzione dei singoli alberi ma permette di fare una previsione del grado di errore da parte del classificatore e di convalidare il modello predittivo. Inoltre, il *Random Forest* non è sensibile al rumore e non è soggetto alle sovrastime dei dati (Watts & Lawrence, 2008).

3.4.3 *Linear Discriminant Analysis (LDA)*

Il *Linear Discriminant Analysis* (LDA) è un algoritmo di classificazione ampiamente utilizzato in molte applicazioni che coinvolgono dati di dimensioni elevate, come ad esempio il riconoscimento facciale e il recupero di immagini. È in grado di proiettare un set di dati su di uno spazio vettoriale di ridotte dimensioni tale da massimizzare il rapporto della distanza tra le classi e la distanza interna delle stesse, garantendo la massima discriminazione ed aiutando a comprendere la distribuzione dei dati sulla base delle loro caratteristiche. La proiezione ottimale, anche detta trasformazione, viene calcolata applicando l'auto-

decomposizione sulle matrici di dispersione. Una limitazione di LDA è che non agisce su matrici di dispersione singole. Questo è noto come il problema del sotto-campionamento o della singolarità che può essere risolto applicando generalmente prima della LDA, una PCA (nel nostro caso FPCA o MFPCA) in grado di alleggerire tempi e spazi di calcolo (Ye, et al., 2004).

3.4.4 *Forward Selection*

La *Forward Selection* è una procedura che combina FPCA e MFPCA sulle serie temporali ricavate dalle formule F00, F01, F03 per ottenere il migliore risultato possibile (in termini di accuratezza globale) sia con LDA che con RF.

La *Forward Selection* inizia con la FPCA unidimensionale e classificazione *supervised* delle componenti ottenute per tutte le singole serie temporali. La serie temporale che permette di ottenere l'accuratezza globale (OA) maggiore viene selezionata ed aggiunta al modello. Successivamente la serie temporale selezionata viene combinata ciclicamente con ognuna delle serie temporali scartate nel passaggio precedente. In questa maniera vengono eseguite MFPCA bidimensionali e classificazione *supervised* delle componenti ottenute. Se il valore di accuratezza globale (OA) supera quello del primo passaggio allora una seconda serie temporale viene aggiunta al modello. Tale strategia prosegue fin a quando l'accuratezza globale continua a migliorare. Quando il valore di accuratezza globale non migliora più il processo si interrompe.

In definitiva, la *Forward Selection* seleziona il minor numero (migliore combinazione) di serie temporali che raggiungono la maggior accuratezza globale. Un basso numero di serie temporali favorisce l'interpretazione delle componenti (stagionalità) ottenute. Tale strategia di selezione rappresenta un'innovazione rispetto ai precedenti lavori di tesi di (Quattrini, et al., 2020) e (Costanzi, et al., 2019).

Al fine di evitare di utilizzare un numero di predittori eccessivo, che potrebbero creare 'rumore' al modello, è stata adottato il metodo di "*Recursive Feature Elimination*" (RFE) che tende a scartare i predittori che non sono necessari.

3.4.5 Accuratezza della mappatura (*Ten Fold Cross Validation*)

Per stimare l'accuratezza della mappatura finale basata sui predittori (componenti funzionali estratte dalla MFPCA applicate alle serie temporali identificate con la *Forward Selection*) si è ricorsi ad una tecnica denominata "*Ten Fold Cross Validation*" capace di partizionare il Reference Data in un set di dimensioni inferiori che permetta al sistema di allenarsi correttamente.

Oltre a adottare le componenti dal metodo sopracitato, in un secondo momento è stata aggiunta la topografia.

Successivamente, gli errori e l'accuratezza della mappatura sono stati valutati mediante la costruzione della "*Confusion Matrix*" o "*Error Matrix*" ed il calcolo di una serie di parametri espressi in %. L'"*Overall Accuracy*", ad esempio, stima in termini generali la qualità e l'attendibilità della mappa mentre la "*Producer Accuracy*" e la "*User Accuracy*" permettono di conoscere l'accuratezza di ogni categoria. Per la precisione la "*Producer Accuracy*" valuta l'accuratezza dal punto di vista di chi ha operato la procedura di classificazione e viene calcolata dividendo il numero dei pixel classificati correttamente (sulla diagonale) per ogni categoria con il suo totale in colonna. La "*User Accuracy*" invece valuta l'accuratezza da parte dell'utente, cioè di chi utilizza la classificazione ai fini pratici. Si calcola dividendo sempre il numero di pixel classificati correttamente per ogni categoria con il totale della riga.

4 RISULTATI E DISCUSSIONI:

4.1 Forward Selection

Dai risultati ottenuti dalla procedura di *Forward Selection* (Vedi Tabella 4-1), si evince che le migliori serie temporali selezionate, con LDA come classificatore, sono state:

- 6 serie temporali per la formula F03 con valori standardizzati ed un'accuratezza globale dell'83,4%;
- 12 serie temporali per la formula F00-01-03 sempre con valori standardizzati ed un'accuratezza globale dell'85,1%.

In entrambi i casi si fa riferimento alle immagini che sono state mascherate e co-registrate ma non normalizzate topograficamente.

Tabella 4-1: Risultati ottenuti con la Forward Selection.

	<u>_TO</u>	<u>_TO</u>			<u>_TO</u>	<u>_TO</u>		
	LDA	LDA	LDA	LDA	RF	RF	RF	RF
	N	S	N	S	N	S	N	S
F00	0,73	0,769	0,781	0,809	0,713	0,744	0,733	0,736
F01	0,765	0,784	0,815	0,828	0,755	0,766	0,762	0,78
F03	0,795	0,818	0,812	0,834	0,744	0,771	0,779	0,772
F00-01-03	0,815	0,818	0,831	0,851	0,763	0,777	0,783	0,772
	<u>_TO</u>	<u>_TO</u>			<u>_TO</u>	<u>_TO</u>		
	LDA	LDA	LDA	LDA	RF	RF	RF	RF
	N	S	N	S	N	S	N	S
F00	5	5	5	6	6	6	4	5
F01	5	6	5	7	5	4	4	6
F03	5	6	6	6	6	7	7	3
F00-01-03	5	6	9	12	6	5	5	3

Per facilitare l'interpretazione delle serie temporali, e poiché in ecologia si tende a adottare un modello che sia il più parsimonioso possibile, è stato deciso di prendere in analisi solo le 6 serie temporali selezionate dalla *Forward Selection* per la formula F03 con valori standardizzati e che vengono riportate nella tabella qui di seguito.

Tabella 4-2: Le 6 migliori serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F03, standardizzate e classificate LDA.

“x”

“1”	"L03_05_03_00_00_30_BIL.txt"
“2”	"L03_07_03_00_00_30_BIL.txt"
“3”	"L03_04_03_00_00_30_BIL.txt"
“4”	"L03_06_05_00_00_30_BIL.txt"
“5”	"L03_08_05_00_00_30_BIL.txt"
“6”	"L03_08_06_00_00_30_BIL.txt"

Nella Tabella 4-2 viene posto in evidenza che tra le bande selezionate è inclusa la banda termica (08) che, nei precedenti lavori di Tesi, non era mai stata presa in considerazione, pur essendo una peculiarità di cui è dotato il satellite Landsat 8, utilizzato per ricavare le immagini, mentre con il satellite Sentinel-2 ciò non sarebbe stato possibile.

Alcuni tra gli indici di vegetazione selezionati dalla *Forward Selection* (Vedi Tabella 4-2), vengono identificati convenzionalmente in letteratura con un nome e con una formula riportati di seguito. Tra questi però, non figura l'NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse, et al., 1973), l'indice di vegetazione più comune ed usato che può assumere valori tra -1 e 1 ed è dato dalla combinazione tra la banda del NIR (05) e quella del RED (04), la cui formula è:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Normalized Difference NIR/Green Green NDVI (GNDVI)

L'indice GNDVI (Buschmann & Nagel, 1993) è in grado di stimare l'attività fotosintetica ed è comunemente usato per determinare l'assorbimento di acqua e azoto nella chioma delle piante. La formula GNDVI implica la banda del NIR (05) e la banda del GREEN (03) ed è data da:

$$GNDVI = (NIR - Green) / (NIR + Green)$$

Normalized Difference Red/Green Redness Index (RI)

L'indice RI (Escadafal & Huete, 1991) permette di raddoppiare la sensibilità degli indici di vegetazione poiché le variazioni di colore del suolo ostacolano notevolmente l'individuazione di bassi tassi di copertura di vegetazione (Bannari, et al., 1995). Questo indice, che coinvolge la banda del RED (04) e del GREEN (03), è definito dalla seguente equazione:

$$RI = (Red - Green) / (Red + Green)$$

Soil Composition Index

Il *Soil Composition Index* (Al-Khaier, 2003) è un indice di vegetazione che coinvolge la banda SWIR 1 (06) e del NIR (05) ed è definito dalla seguente formula:

$$\text{Soil Composition Index} = (Swir1 - NIR) / (Swir1 + NIR)$$

Un altro risultato, ottenuto dal confronto tra i classificatori *Random Forest* e *Linear Discriminant Analysis*, durante la procedura di *Forward Selection* (Vedi Tabella 4-1), è che, tra i due, ad aver performato meglio, è stato LDA con una media di 6 punti % maggiore rispetto a RF. Si tratta di un risultato inaspettato ed interessante perché, a differenza dei precedenti lavori di tesi, è stato sempre e solo adottato come algoritmo di classificazione il *Random Forest*. Inoltre, uno dei motivi per cui LDA possa aver performato meglio, può essere ricondotto al fatto che, prima di essere coinvolto nella procedura di *Forward Selection*, gli sia stata applicata una FPCA combinata ad una MFPCA che secondo l'articolo pubblicato da (Ye, et al., 2004) possa ovviare al problema della singolarità (Vedi Sotto-capitolo 3.4.3).

Prendendo sempre in esame la Tabella 4-1, le migliori serie temporali selezionate si riferiscono ad immagini che non hanno subito il processo di normalizzazione topografica. Questo è sorprendente in quanto ci si aspettava che normalizzando le immagini, e riducendo quindi l'effetto della differente illuminazione per via della particolare conformazione del terreno, si ottenesse un risultato migliore.

Per quanto riguarda invece l'accuratezza ottenuta con la formula F03 con valori standardizzati ed LDA come classificatore (Vedi tabella 4-1), si raggiunge un valore elevato, pari all'83,4% che si avvicina a quello ottenuto nella tesi di (Quattrini, et al., 2020) in cui però le immagini collezionate erano delle Sentinel-2 e la metodologia sviluppata non era la stessa adottata in questa tesi.

4.2 Classificazione supervised delle serie temporali selezionate

Dalla classificazione *supervised* delle migliori serie temporali selezionate, sono state ottenute le matrici di confusione per la formula F03, per la F00-01-03 e poi per entrambe, con l'aggiunta della topografia. Anche in questo caso è stato deciso di considerare e confrontare solo le matrici derivate dalla formula F03 e dalla F03 con topografia, riconducendosi sempre al concetto di parsimonia di un modello. Le restanti matrici sono consultabili nella sezione Appendice. Oltre all'accuratezza globale finale ed il parametro "Kappa", sono riportati nelle Tabelle 4-3 e 4-4 la "Producer Accuracy" e la "User Accuracy" che stimano le accuratèzze per ogni categoria. Tra le 11 rappresentate, focalizzeremo lo sguardo soprattutto sulle categorie rappresentate dagli ostrieti e dai querceti, poiché nella tesi di (Quattrini, et al., 2020) tendevano a confondersi maggiormente.

Tabella 4-3: Matrice di confusione o di errore delle F03.

	C	G	J	L	M	O	P	Q	R	S	U	UA
C	4,03	0,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00	0,06	87,32
G	0,97	4,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	72,22
J	0,00	0,00	3,57	0,00	0,32	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,13	80,88
L	0,00	0,00	0,00	11,04	0,06	0,91	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	88,54
M	0,13	0,26	0,00	0,00	14,48	0,06	0,00	0,32	0,00	0,00	0,06	94,49
O	0,00	0,00	0,00	0,97	0,00	15,91	0,00	1,30	0,39	0,45	0,00	83,62
P	0,71	0,06	0,97	0,00	0,32	0,00	4,22	0,00	0,00	0,00	0,00	67,01
Q	0,00	0,39	0,00	0,00	0,06	1,88	0,00	8,77	0,78	0,26	0,19	71,05
R	0,00	0,00	0,32	0,00	0,32	0,52	0,00	0,32	8,77	0,00	0,00	85,44
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	4,48	0,00	95,83
U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,42	93,15
PA	68,89	81,25	73,33	91,89	91,02	81,67	81,25	79,41	84,38	86,25	90,67	

Tabella 4-4: Parametri riferiti alla matrice di confusione o di errore delle F03.

Accuracy	Kappa	Accuracy SD	Kappa SD
0.8392236	0.8177842	0.06044923	0.06810162

Dall'osservazione della "Producer Accuracy" e "User Accuracy" (Vedi Tabella 4-3), si può affermare che quasi tutte le categorie risultano essere ben rappresentate in mappa con un'accuratezza globale finale dell'83,9%.

Partendo dalla "Producer Accuracy", le categorie con un valore % relativamente basso (quindi sono sottorappresentate) sono rispettivamente: i coltivi (68,89%), i gineprei (73,33%) ed i querceti (79,41%). Gli ostrieti invece hanno un valore dell'81,67%. Le restanti categorie

superano l'80%. Per quanto riguarda invece la “*User Accuracy*” ad avere valori bassi, sono il ginestreto (72.22%), la prateria (67,01%) ed i querceti (71,05%) (quindi sono sovra-rappresentate). I coltivi invece migliorano e gli ostrieti hanno un valore pari a 83,62%. Il motivo per cui categorie come la prateria o il ginestreto possono venire maggiormente confuse con altre, può essere dato dal fatto che sono degli elementi più dinamici rispetto alle formazioni boschive. Inoltre, la risoluzione spaziale del Landsat (30 metri) può non essere idonea a queste categorie e sarebbe quindi più opportuno ricorrere a maggiori risoluzioni che può fornire ad esempio il satellite Sentinel-2.

Analizzando nello specifico le percentuali delle categorie degli ostrieti e dei querceti e confrontandole con quelle della tesi di (Quattrini, et al., 2020), queste risultano più equilibrate, seppur i querceti continuano ad essere leggermente sovrastimati e quindi confusi principalmente con gli ostrieti e con i rimboschimenti. Nonostante ciò, nel caso dei querceti ed ostrieti, il Landsat 8, seppure meno risoluto, soprattutto nell'area del Monte Frasassi, sembrerebbe mappare meglio come si può notare visivamente in figura 4-1.

Nella Tabella 4-5 è invece riportata la matrice di confusione riferita alla formula F03 a cui è stata aggiunta la topografia, mentre nella Tabella 4-6 vi sono i parametri relativi.

Tabella 4-5: Matrice di confusione o di errore delle F03 con la topografia.

	C	G	J	L	M	O	P	Q	R	S	U	UA
C	4,87	0,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	91,46
G	0,65	3,77	0,39	0,00	0,00	0,06	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	68,24
J	0,00	0,32	3,96	0,00	0,00	0,00	0,52	0,00	0,32	0,00	0,00	77,22
L	0,00	0,00	0,00	10,58	0,06	0,97	0,00	0,06	0,32	0,00	0,00	88,11
M	0,32	0,32	0,00	0,00	15,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	93,90
O	0,00	0,00	0,00	1,30	0,00	15,52	0,00	1,36	0,39	0,13	0,00	82,99
P	0,00	0,00	0,52	0,00	0,00	0,00	4,35	0,00	0,00	0,00	0,00	89,33
Q	0,00	0,32	0,00	0,00	0,26	2,21	0,00	8,64	0,78	0,06	0,32	68,56
R	0,00	0,00	0,00	0,13	0,32	0,45	0,00	0,32	8,57	0,00	0,00	87,42
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,26	0,00	0,00	0,00	5,00	0,00	90,59
U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,55	100,00
PA	83,33	72,5	81,33	88,11	94,29	79,67	83,75	78,24	82,50	96,25	93,33	

Tabella 4-6: Parametri riferiti alla matrice di confusione o di errore delle F03 con la topografia.

Accuracy	Kappa	Accuracy SD	Kappa SD
0.848044	0.827743	0.06055521	0.06853988

Aggiungendo la topografia, l'accuratezza globale finale migliora complessivamente di un 1% e si attesta all'84,8%. Categoria come i coltivi, la prateria, le formazioni ripariali e l'urbano, migliorano sia in termini di “*Producer Accuracy*” che di “*User Accuracy*”. Peggiorano invece i querceti e gli ostrieti che continuano a confondersi tra loro.

Da ciascuna matrice è stato poi possibile ottenere le mappe finali riportate singolarmente nella sezione Appendice. Tra quelle prodotte è stato deciso di mettere a confronto quella ottenuta con la formula F03, a cui è stata aggiunta la topografia, con quella ottenuta nell'articolo di (Pesaresi, et al., s.d.) in cui però, invece delle Landsat, è stato utilizzato il Sentinel-2 ed in più l'accuratezza globale è inferiore rispetto a quella ottenuta in questo lavoro.

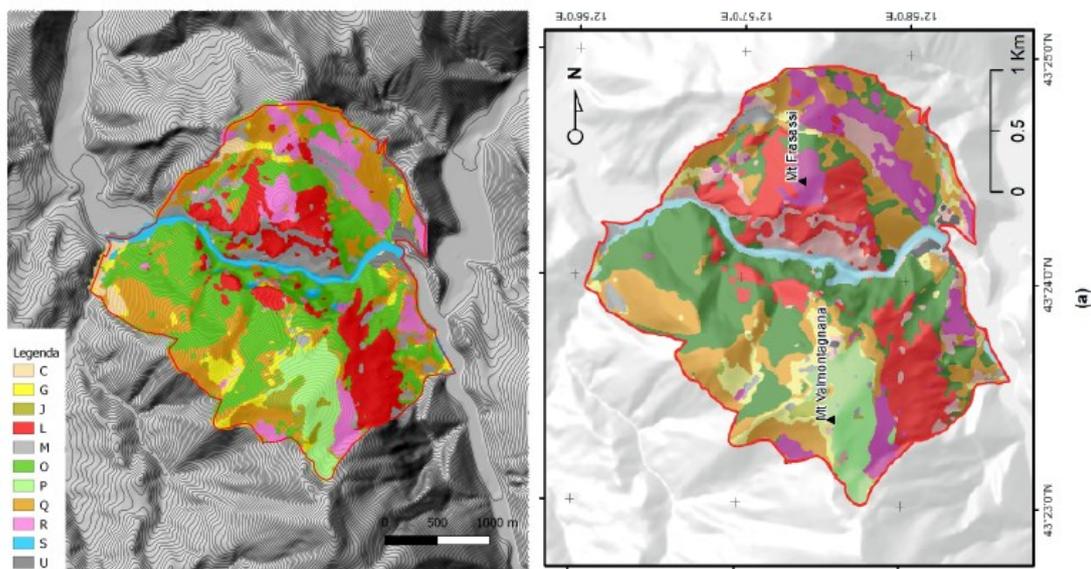


Figura 4-1: Confronto visivo tra la mappa ottenuta dalle Landsat (a sinistra) e la mappa prodotta con le Sentinel-2 (a destra). Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R-Rimboscimento; S-Ripariale e U-Urbani.

Infine, è stato possibile per ogni categoria vegetazionale, costruire i profili stagionali medi delle 6 serie temporali, permettendoci di descriverne il comportamento nel corso delle diverse stagioni e valutare l'effetto della normalizzazione. Le comunità, infatti, esprimono la loro stagionalità in maniera differente in relazione alle bande che prendiamo in analisi. La *Forward Selection* è stata quindi utile a trovare le bande o le combinazioni tra bande più indicate a discriminare la vegetazione. Più la stagionalità è diversa e più la mappatura ha successo.

Facendo un confronto visivo tra i profili non standardizzati e quelli standardizzati, si può notare che maggiori differenze si riscontrano in quest'ultimi come nel caso della categoria

rappresentata dai rimboschimenti la cui stagionalità è espressa in maniera diversi nelle 6 serie temporali.

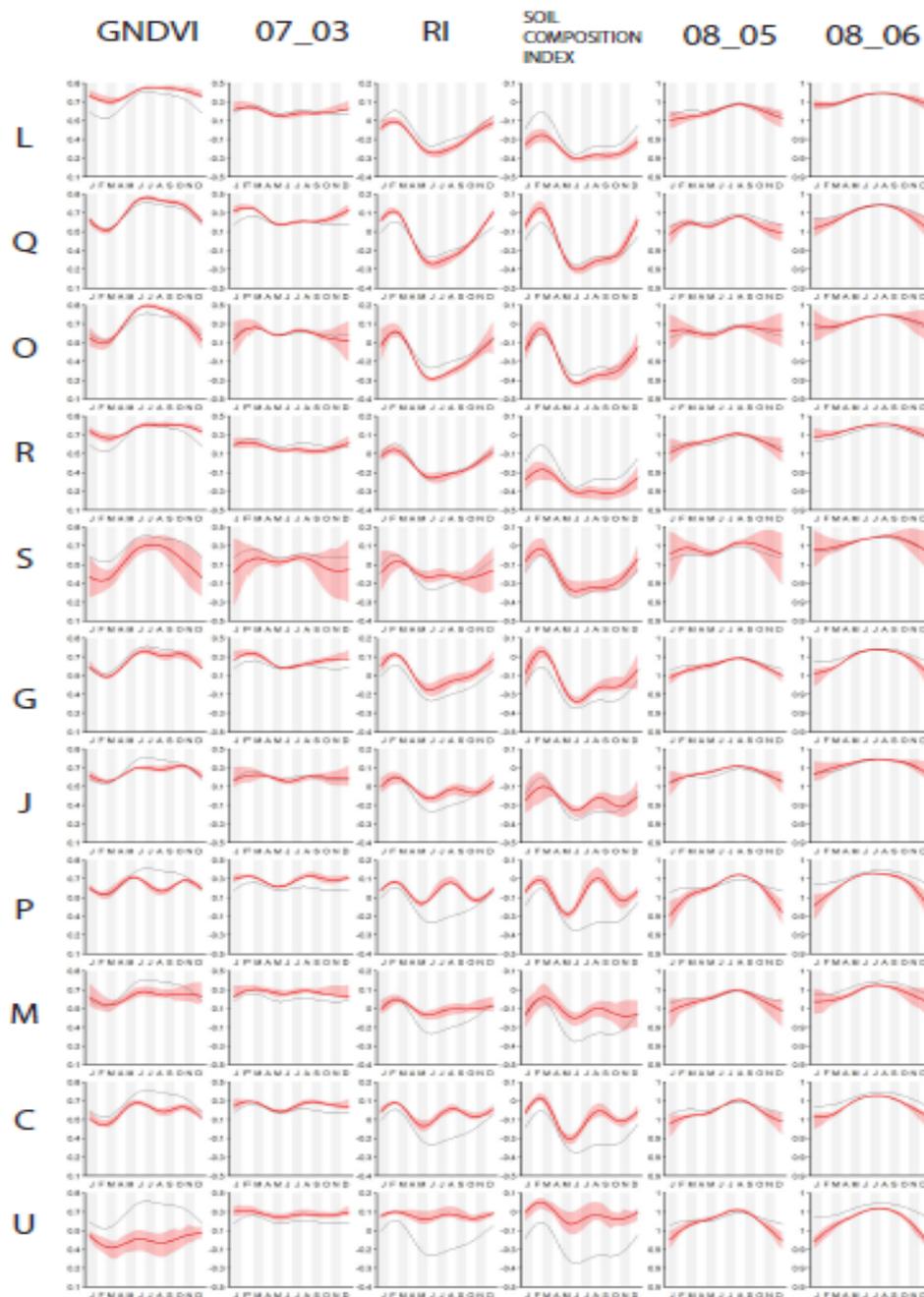


Figura 4-2: Profili temporali medi delle categorie vegetazionali mappate nelle 6 serie temporali selezionate, non standardizzate e decomposte dalla MFPCA in F03 con LDA. Nelle colonne abbiamo le 6 serie temporali, mentre sulle righe le associazioni vegetali, nel seguente ordine: L-Lecce; Q-Querceto; O-Ostrieto; R-Rimboschimento; S-Ripariale; G-Ginestreto; J-Ginepreto; P-Prateria; M-Mosaico; C-Coltivi; U-Urbani.

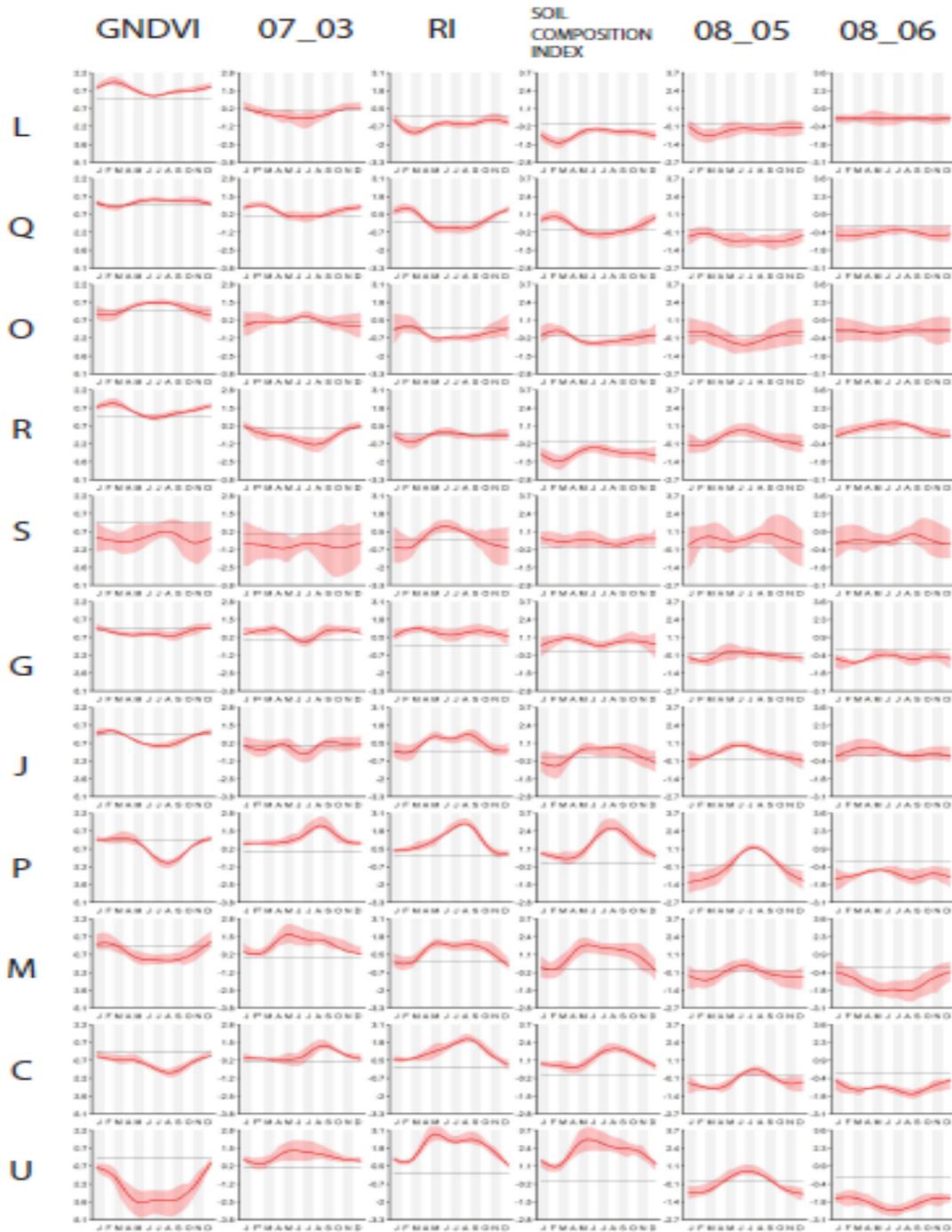


Figura 4-3: Profili temporali medi delle categorie vegetazionali mappate nelle 6 serie temporali selezionate, standardizzate e decomposte dalla MFPCA ottenendo la migliore accuratezza in F03 con LDA. Nelle colonne abbiamo le 6 serie temporali, mentre sulle righe le associazioni vegetali, nel seguente ordine: L-Lecceta; Q-Querceto; O-Ostrieto; R-Rimboscimento; S-Ripariale; G-Ginestreto; J-Ginepreto; P-Prateria; M-Mosaico; C-Coltivi; U-Urbani.

5 CONCLUSIONI

L'introduzione della procedura di *Forward Selection* ha agevolato l'individuazione e l'interpretazione delle migliori serie temporali, combinando FPCA e MFPCA e raggiungendo, in termini di accuratezza globale, il miglior risultato. Nel corso della procedura è emerso che le migliori serie temporali sono state derivate da indici (combinazioni di più bande), alcuni dei quali convenzionalmente riconosciuti in letteratura. Tra le formule prese in considerazione, quella che ha fornito una maggiore accuratezza (83,4%), con il minor numero di serie temporali selezionate (6), è stata la formula F03. Per quanto riguarda le bande selezionate, figura anche la banda termica, finora mai analizzata e che, evidentemente, contribuisce a discriminare alcune categorie di vegetazione mappate. Confrontando i classificatori RF e LDA, il più performante è risultato LDA per le serie temporali di immagini non normalizzate topograficamente, perché probabilmente, applicandogli prima una FPCA combinata ad una MFPCA, ne sono state migliorate le prestazioni.

È stato poi possibile comparare la matrice di confusione e la mappa ottenuta per la F03 a cui è stata aggiunta la topografia, in cui l'accuratezza globale finale raggiunge un valore dell'84,8% (aumentata di un 1% rispetto alle F03) con quella ottenuta nell'articolo di (Pesaresi, et al., s.d.). In linea generale, quasi tutte le categorie di vegetazione sono ben rappresentate in mappa. Questo è dato dal fatto che è stata applicata la topografia. Gli ostrieti ed i querceti sono complessivamente migliorati, soprattutto in termini di pattern spaziale nell'area di Monte Frasassi, anche se ancora tendono a confondersi.

Inoltre, sono stati creati i profili stagionali medi delle migliori serie temporali, descrivendone il comportamento nel corso delle diverse stagioni e dell'effetto della normalizzazione. Le maggiori differenze si individuano nei profili standardizzati.

In conclusione, ci si può ritenere soddisfatti nell'aver deciso di esplorare le serie temporali ottenute da dati Landsat 8 in tutta la loro risoluzione spettrale poiché abbiamo ottenuto mappature con un buon livello di precisione, pur avendo una minore risoluzione spettrale, temporale (ogni 16 giorni) e spaziale (30 metri) rispetto al Sentinel-2. Certamente la risoluzione a 30 metri è indicata per alcune categorie; nel caso di praterie, gineprei e ginestreti,

trattandosi di elementi dinamici sarebbe più coerente adottare risoluzioni maggiori a 10 e 20 metri tipiche del Sentinel-2.

In vista di futuri sviluppi un'opportunità potrebbe essere quella di prendere in considerazione, in tutta la loro risoluzione spettrale il Landsat 8 ed il Sentinel-2 insieme, combinando diverse risoluzioni e riuscendo magari a captare e discriminare ancora di più le categorie mappate. Ciò è permesso dalla MFPCA che è una tecnica molto elastica e che può consentire di ottimizzare ulteriormente i risultati. L'applicazione del telerilevamento sulla fenologia combinata alla fitosociologia dimostra di essere ancora un valido ed efficiente metodo che contribuisce a rispondere all'urgente esigenza di un costante monitoraggio, ai fini del mantenimento e conservazione della vegetazione e degli habitat, come previsto dalla Direttiva Habitat (92/43/CEE) nell'area della Gola di Frasassi così come in tutte le altre aree naturali e protette al fine di preservare l'equilibrio ambientale e l'integrità delle biodiversità.

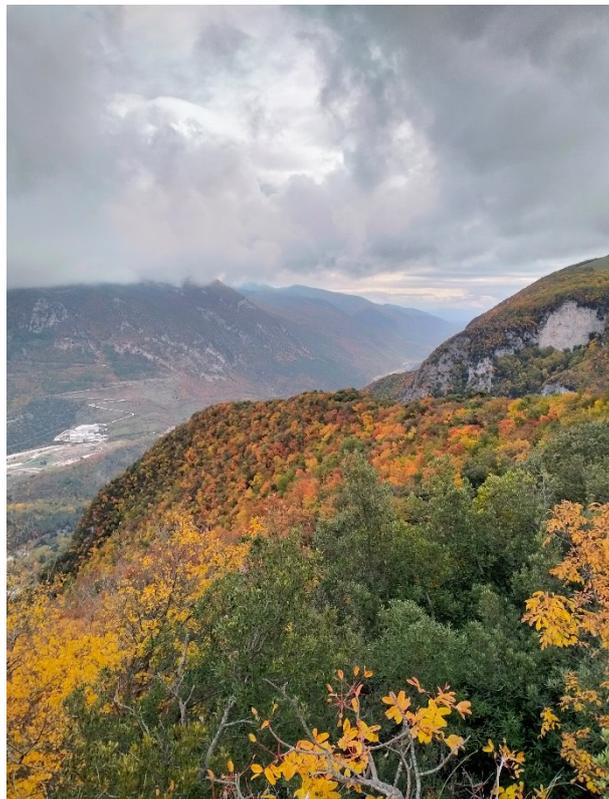


Figura 5-1: Monte Frasassi. La foto è stata scattata durante un'escursione in loco il 5 novembre 2021.

6 APPENDICE

Tabella 6-1: Matrice di confusione o di errore delle F00-01-03.

	C	G	J	L	M	O	P	Q	R	S	U	UA
C	5,13	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	89,77
G	0,39	4,09	0,32	0,00	0,00	0,00	0,32	0,13	0,00	0,00	0,00	77,78
J	0,00	0,65	3,57	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,32	77,46
L	0,00	0,00	0,00	10,71	0,13	1,49	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	84,62
M	0,00	0,13	0,00	0,00	14,55	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	0,06	94,92
O	0,00	0,00	0,00	0,97	0,06	15,39	0,00	1,82	0,32	0,00	0,00	82,87
P	0,32	0,00	0,91	0,00	0,13	0,00	4,42	0,00	0,00	0,00	0,00	76,40
Q	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	2,08	0,00	8,18	0,39	0,26	0,00	72,83
R	0,00	0,00	0,06	0,32	0,32	0,39	0,00	0,32	9,35	0,00	0,06	86,23
S	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19	0,13	0,00	0,00	0,00	4,94	0,00	93,83
U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,42	93,15
PA	87,78	78,75	73,33	89,19	91,43	79,00	85,00	74,12	90,00	95,00	90,67	

Tabella 6-2: Parametri riferiti alla matrice di confusione o di errore delle F00-01-03.

Accuracy	Kappa	Accuracy SD	Kappa SD
0.8470862	0.8267478	0.05609615	0.06318442

Tabella 6-3: Matrice di confusione o di errore delle F00-01-03 con topografia.

	C	G	J	L	M	O	P	Q	R	S	U	UA
C	4,81	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	92,50
G	0,84	4,09	0,58	0,00	0,00	0,00	0,32	0,32	0,00	0,00	0,00	66,32
J	0,00	0,32	3,83	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,32	0,00	0,00	80,82
L	0,00	0,00	0,00	10,84	0,00	1,17	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	87,89
M	0,13	0,00	0,00	0,00	15,00	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	0,00	95,45
O	0,00	0,00	0,00	0,97	0,06	15,52	0,00	2,34	0,32	0,00	0,00	80,74
P	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	4,61	0,00	0,00	0,00	0,00	91,03
Q	0,00	0,39	0,00	0,00	0,19	2,40	0,00	7,47	0,39	0,00	0,32	66,86
R	0,00	0,00	0,00	0,19	0,32	0,32	0,00	0,32	9,03	0,00	0,00	88,54
S	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	5,19	0,00	97,56
U	0,00	0,00	0,00	0,00	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,55	93,33
PA	82,22	78,8	78,67	90,27	94,29	79,67	88,75	67,65	86,88	100,00	93,33	

Tabella 6-4: Parametri riferiti alla matrice di confusione o di errore delle F00-01-03 con la topografia.

Accuracy	Kappa	Accuracy SD	Kappa SD
0.849396	0.8293018	0.06146482	0.0692676

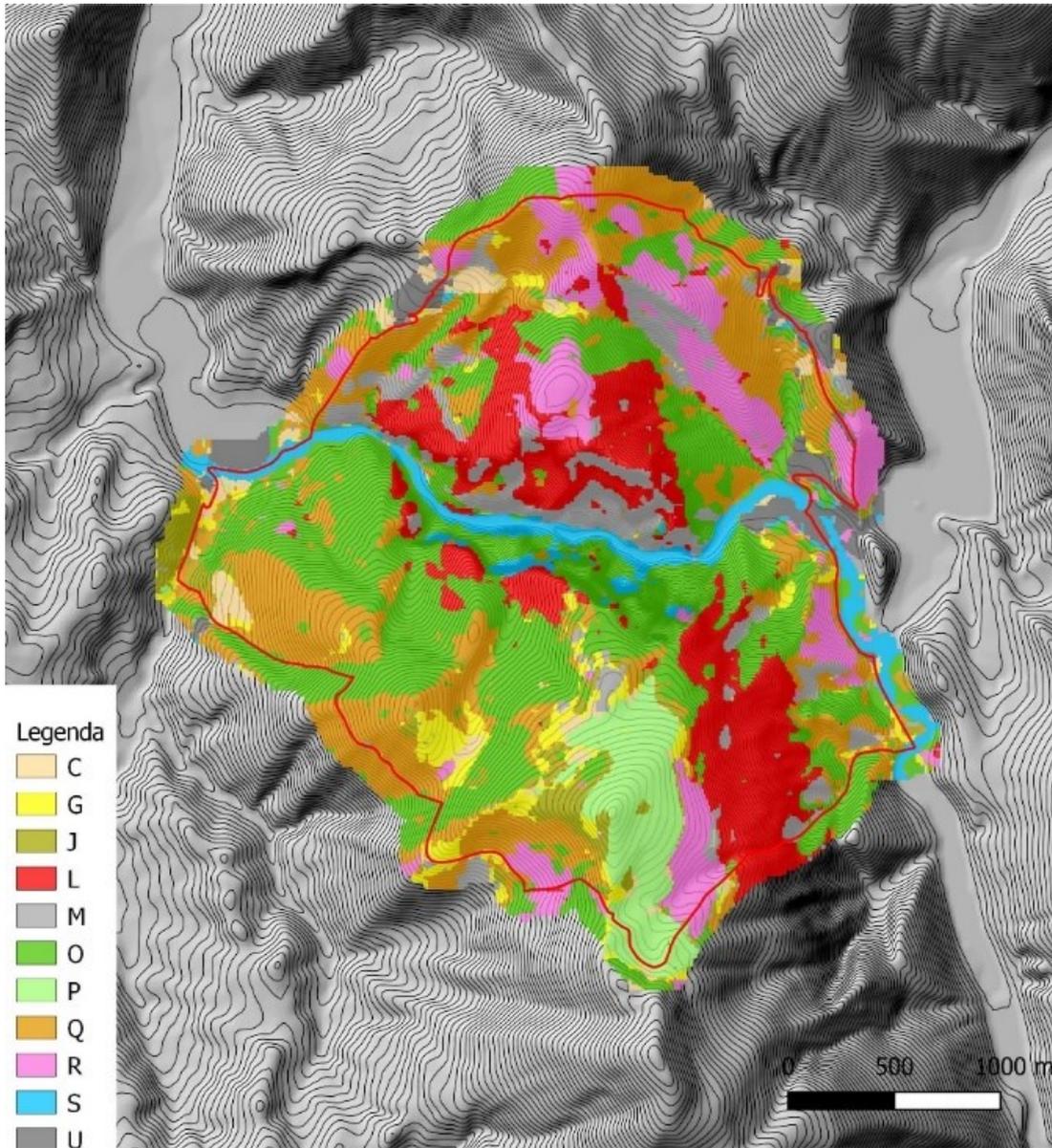


Figura 6-1: Mappa della vegetazione del Sito della Gola di Frasassi “IT5320003” derivante dalla classificazione Supervised delle 6 serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F03 e con classificatore LDA. Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R- Rimboschimento; S-Ripariale e U-Urbani.

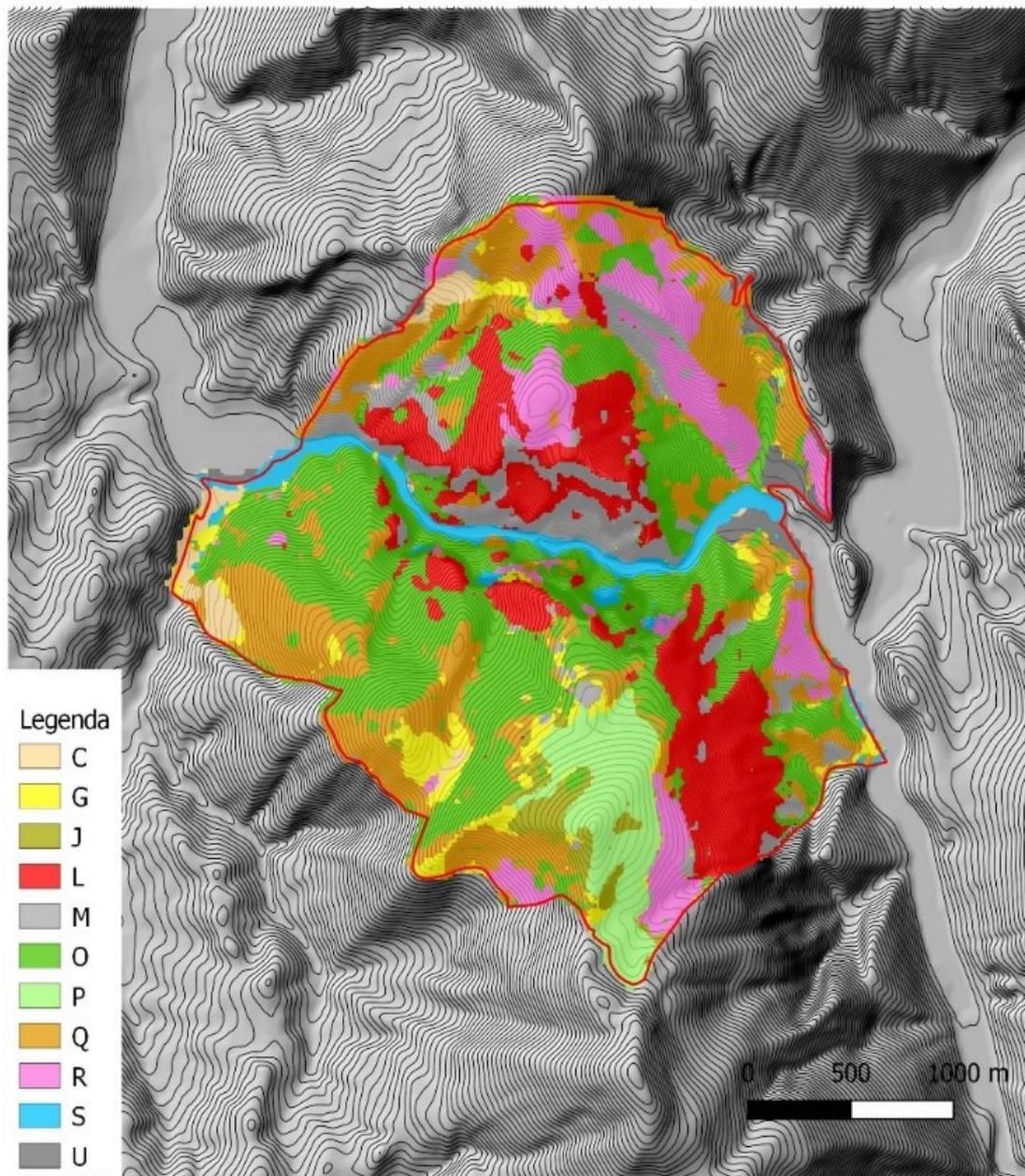


Figura 6-2: Mappa della vegetazione del Sito della Gola di Frasassi “IT5320003” derivante dalla classificazione Supervised delle 6 serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F03 a cui è stata aggiunta la topografia e con classificatore LDA. Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R- Rimboschimento; S-Ripariale e U-Urbani.

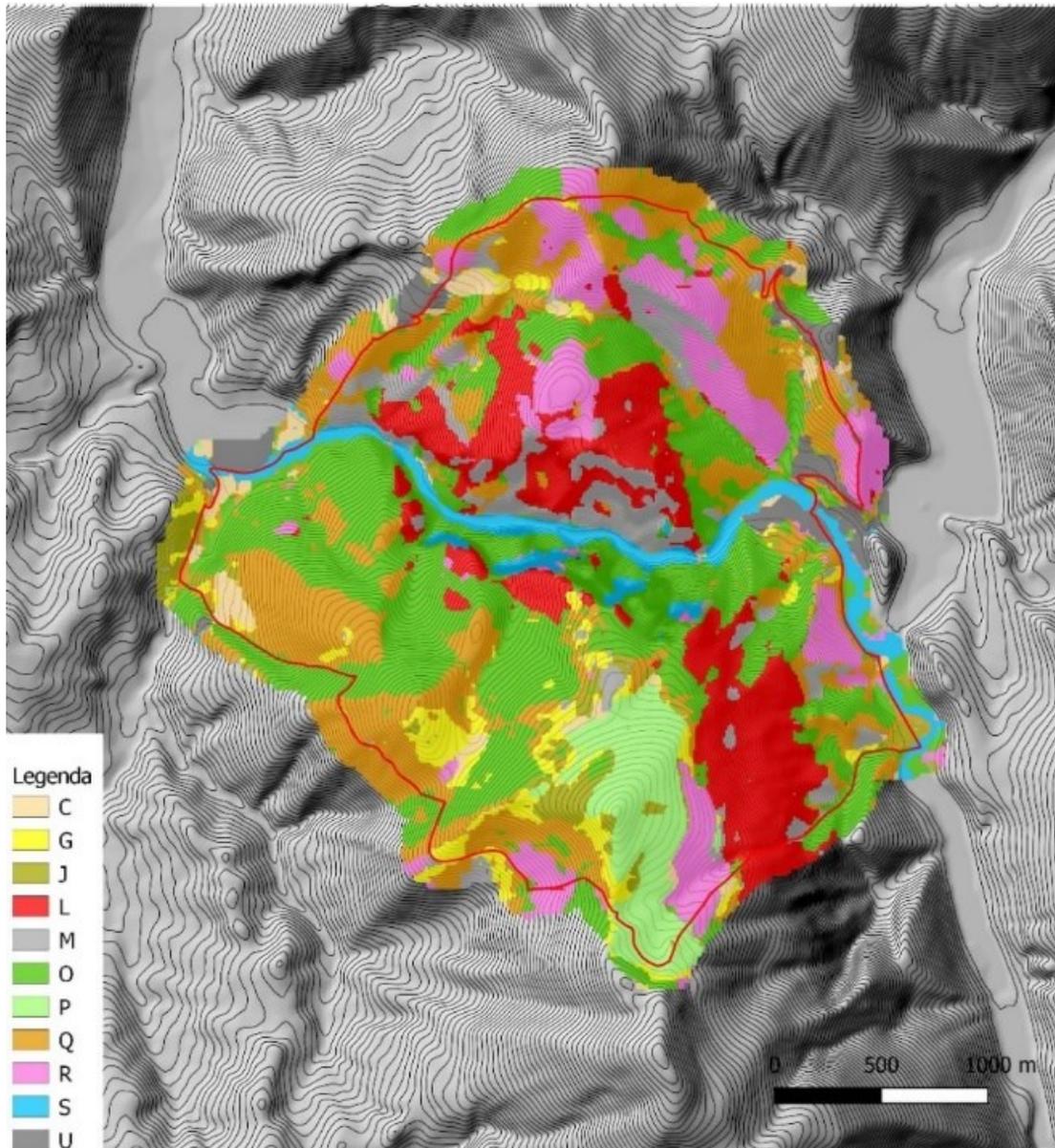


Figura 6-3: Mappa della vegetazione del Sito della Gola di Frasassi “IT5320003” derivante dalla classificazione Supervised delle 12 serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F00-01-03 e con classificatore LDA. Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R- Rimboscimento; S-Ripariale e U-Urbani.

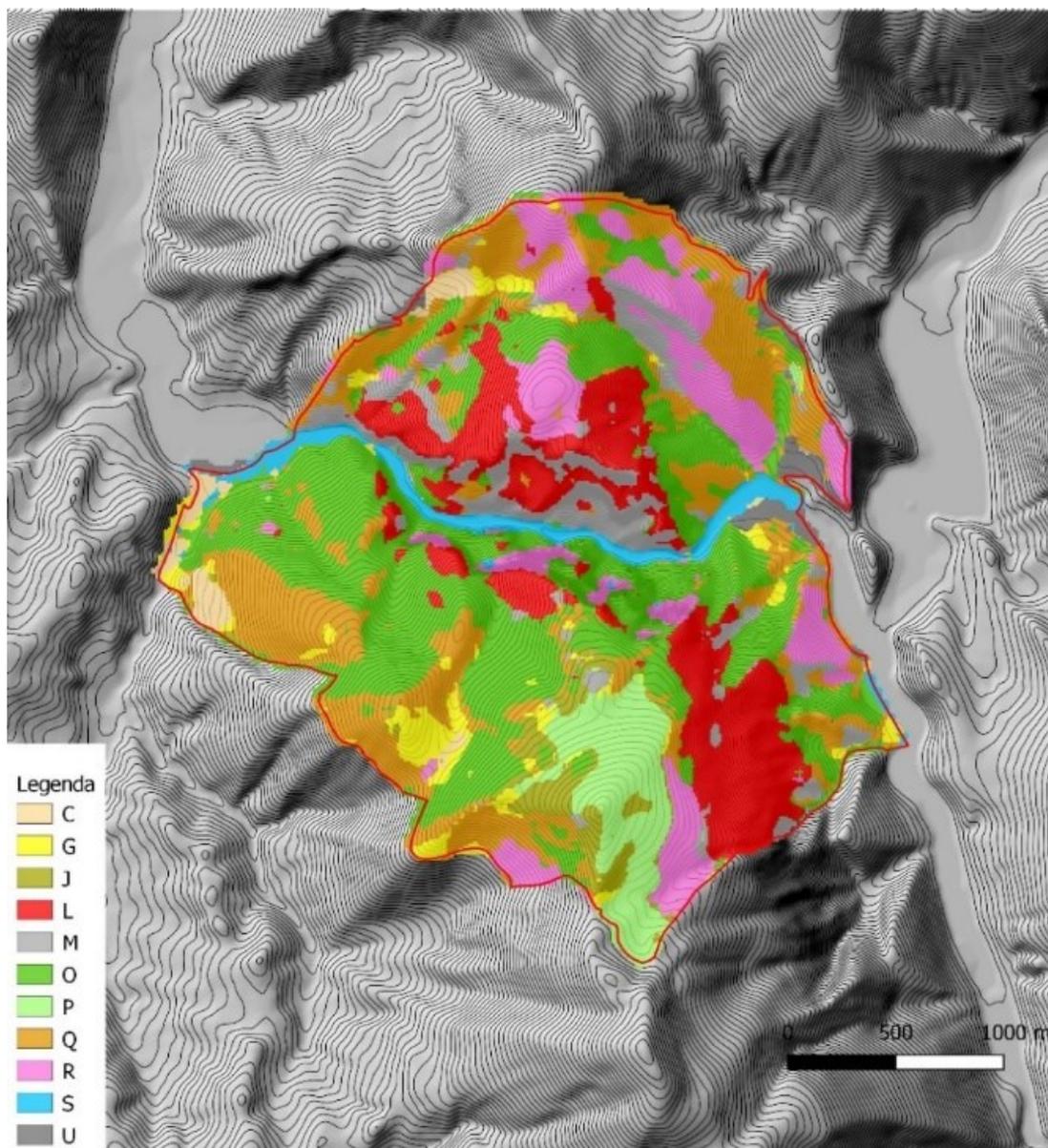


Figura 6-4: Mappa della vegetazione del Sito della Gola di Frasassi "IT5320003" derivante dalla classificazione Supervised delle 12 serie temporali selezionate dalla Forward Selection con formula F00-01-03 a cui è stata aggiunta la topografia e con classificatore LDA. Le categorie presenti sono le seguenti: C-Coltivi; G-Ginestreto; J-Ginepreto; L-Lecceta; M-Mosaico; O-Ostrieto; P-Prateria; Q-Querceto; R- Rimboschimento; S- Ripariale e U-Urbani.

7 BIBLIOGRAFIA

- Akar, Ö. & Güngör, O., 2012. Classification of multispectral images using Random Forest algorithm. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, Volume 1, pp. 105-112.
- Al-Khaier, 2003. *Soil Salinity Detection Using Satellite Remotes Sensing*, Enschede, The Netherlands: International institute for Geo-information science and earth observation.
- Bannari, A., Morin, D. & Bonn, F., 1995. A Review of Vegetation Indices. *Remote Sensing Reviews*, Volume 13, pp. 95-120.
- Biondi, E., 2011. Phytosociology today: Methodological and conceptual evolution. *Plant Biosystems*, pp. 19-29.
- Biondi, E. et al., 2010. Le serie di vegetazione della Regione Marche. In: *La vegetazione d'Italia con carta delle serie di vegetazione in scala 1:500.000*. Roma: Palombi Editori, pp. 230-255.
- Biondi, E. et al., 2009. *Carta degli Habitat in base alla Direttiva 92/43/CEE SIC Gola di Frasassi IT5320003 (AB29) (Direttiva 92/43/CEE)*. [Online] Available at: http://www.ambiente.regione.marche.it/Portals/0/Ambiente/Natura/ReteNatura2000/CARTE_FITO_HABITAT/Ancona/SIC_GOLA%20DI%20FRASASSI/HABITAT_IT5320003.pdf [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].
- Biondi, E. et al., 2009. *Carta della Vegetazione (Fitosociologica) SIC Gola di Frasassi IT5320003 (AB29) (Direttiva 92/43/CEE)*. [Online] Available at: http://www.ambiente.regione.marche.it/Portals/0/Ambiente/Natura/ReteNatura2000/CARTE_FITO_HABITAT/Ancona/SIC_GOLA%20DI%20FRASASSI/FITO_IT5320003.pdf [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].

- Biondi, E. et al., 2007. Individuazione e commento degli habitat (Direttiva 92/43/CEE) presenti in un territorio dell'Appennino centrale: il Parco regionale della Gola della Rossa e di Frasassi. *Fitosociologia*, 44(2), pp. 289-298.
- Breiman, L., 2001. *Random Forests*, Berkeley: Statistics Department University of California.
- Bruno, F., Petriccione, B. & Attorre, F., 2003. La cartografia della vegetazione in Italia. *Braun-Blanquetia Recueil de travaux de geobotanique/ Review of geobotanical monographs*, Volume 26.
- Buschmann, C. & Nagel, E., 1993. In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 14, pp. 711-722.
- Chen, L.-H. & Jiang, C.-R., 2016. *Multi-dimensional Functional Principal Component Analysis*. [Online] Available at: <https://arxiv.org/pdf/1510.04439.pdf> [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].
- Colavito, C., Mancini, A. & Pesaresi, S., 2020. *Classificazione di time-series da immagini Sentinel-2 mediante Multi-variate Functional Principal Component Analysis nell'ambito della Land Surface Phenology*. Ancona: Università Politecnica delle Marche.
- Consiglio regionale delle Marche, 1997. *Leggi e regolamenti regionali*. [Online] Available at: https://www.consiglio.marche.it/banche_dati_e_documentazione/leggi/dettaglio.php?arc=vig&idl=1211 [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].
- Costanzi, V., Pesaresi, S. & Casavecchia, S., 2019. *Mappatura della vegetazione e degli habitat della ZSC "IT5320003-Gola di Frasassi" basata sulla fenologia telerilevata*. Ancona: Università Politecnica delle Marche.
- D.R.E.Am.italia, 2015. *Piano di Gestione dei Siti Natura 2000 - P.S.R. Marche 2007- 2013 Asse 3 Misura 3.2.3.*, s.l.: s.n.
- Deplano, L., Mancini, A. & Pesaresi, S., 2020. *Generazione e classificazione di time-series da immagini Sentinel-2 nell'ambito della Land Surface Phenology*. Ancona: Università Politecnica delle Marche.

- Escadafal, R. & Huete, A., 1991. Improvement in remote sensing of low vegetation cover in arid regions by correcting vegetation indices for soil "noise". *Comptes Rendus - Academie des Sciences, Serie II*, Volume 11, pp. 1385-1391.
- Forconi, R., Mancini, A. & Simone, P., 2020. *Classificazione di time-series da immagini Sentinel-2 mediante Functional Principal Component Analysis nell'ambito della Land Surface Phenology*. Ancona: Università Politecnica delle Marche.
- Grolemund, G. & Wickham, H., 2011. Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, 40(3), pp. 1-25.
- Hijmans, R. J. et al., 2020. *raster: Geographic Data Analysis and Modeling, R package version 3.0-12*. [Online] Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=raster> [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].
- Kotsiantis, S. B., 2007. Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques. *Informatica*, Volume 31, pp. 249-268.
- Leutner, B., Horning, N., Schwalb-Willmann, J. & Hijmans, R. J., 2019. *RStoolbox: Tools for Remote Sensing Data Analysis*. [Online] Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=RStoolbox> [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].
- Matongera, T. N. ., M. O., Sibanda, M. & Odindi, J., 2021. Estimating and Monitoring Land Surface Phenology in Rangelands: A Review of Progress and Challenges. *Remote Sensing*.
- Ministero della Transizione Ecologica, 2021. *Direttiva "Habitat"*. [Online] Available at: <https://www.mite.gov.it/pagina/direttiva-habitat> [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].
- Pedrotti, F., 2014. *History of vegetation mapping in Europe*, Luxembourg : European Environment Agency.
- Pesaresi, S., Mancini, A., Quattrini, G. & Casavecchia, S., 2020. Mapping Mediterranean Forest Plant Associations and Habitats with Functional Principal Component Analysis Using Landsat 8 NDVI Time Series. *Remote Sensing*.

- Pesaresi, S., Mancini, A., Quattrini, G. & Casavecchia, S., s.d. *Functional analysis to map habitat in Special Area of Conservation from Sentinel-2 time-series [Manoscritto sottomesso per la pubblicazione]*. Ancona: Università Politecnica delle Marche.
- QGIS Development Team, 2019. *QGIS Geographic Information System*, s.l.: QGIS Association.
- Quattrini, G., Pesaresi, S. & Casavecchia, S., 2017. *Classificazione e mappatura delle serie temporali NDVI di alcune comunità forestali del Monte Conero*. Ancona: Università Politecnica delle Marche.
- Quattrini, G., Pesaresi, S., Casavecchia, S. & Mancini, A., 2020. *Mappatura della vegetazione e degli habitat tramite l'analisi della fenologia telerilevata: il caso studio della ZSC "IT5320003-Gola di Frasassi"*. Ancona: Università Politecnica delle Marche.
- R Core Team, 2019. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Rete Natura 2000 Marche, 2016. *IT5320003 - Gola di Frasassi*. [Online] Available at: https://www.regione.marche.it/natura2000/pagina_basea473.html?id=1586 [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].
- Riano, D., Chuvieco, E., Javier, S. & Aguado, I., 2003. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(5), pp. 1056-1061.
- Rivas-Martínez, S., Sáenz, S. & Penas, A., 2011. Worldwide bioclimatic classification system.. *Global Geobotany*, 1(1), pp. 1-634.
- Rouse, J. et al., 1973. *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*, Texas A&M Univ., College Station: Remote Sensing Center.
- USGS science for a changing world, 2020. *How do I use a scale factor with Landsat Level-2 science products?*. [Online] Available at: https://www.usgs.gov/faqs/how-do-i-use-a-scale-factor-landsat-level-2-science-products?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products [Consultato il giorno 5 dicembre 2021].

USGS science for changing world, 2017. *Landsat 8*. [Online]
Available at: 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 il giorno 5 dicembre 2021].

USGS, s.d. *Earth Explorer*. [Online]
Available at: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
[Consultato il giorno 5 dicembre 2021].

Watts, J. D. & Lawrence, R. L., 2008. *Merging random forest classification with an object-oriented approach for analysis of agricultural lands*. Bozeman: Spatial Sciences Center, Montana State University.

Wood, S. N., 2016. Smoothing parameter and model selection for general smooth models. *Journal of the American Statistical Association*, 111(516), pp. 1548-1575.

Ye, J., Janardan, R. & Li, Q., 2004. *Two-Dimensional Linear Discriminant Analysis*. Vancouver, Advances in Neural Information Processing Systems 17 [Neural Information Processing Systems, NIPS].