



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

LE ANALISI FUNZIONALI ED IL
TELERILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO
DEL PROCESSO DI RINATURALIZZAZIONE
DELLA VEGETAZIONE NEI TRACCIATI DEI
METANODOTTI
TIPO TESI: sperimentale

Studente:
GIANMARCO CECCHINI

Relatore:
DOTT. SIMONE PESARESI

Correlatore:
PROF.SSA SIMONA CASAVECCHIA

Correlatore:
PROF. ADRIANO MANCINI

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

Dedicato a chi persevera ogni giorno,
affinché i grandi risultati siano raggiungibili non solo al più bravo,
ma anche a chi non si fa sopraffare dai problemi della vita.

SOMMARIO

SOMMARIO	3
ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	9
CAPITOLO 1 MATERIALI E METODI	12
1.1 Il metanodotto Rimini-Sansepolcro	12
1.1.1 Quadro progettuale dei metanodotti.....	14
1.1.2 Caratterizzazione bioclimatica.....	15
1.1.3 Aree Rete Natura 2000	17
1.1.4 Caratterizzazione vegetazionale.....	19
1.2 Aree test	22
1.3 Serie temporali tele-rilevate.....	30
1.3.1 Satellite Sentinel-2.....	31
1.3.2 Indice NDVI	32
1.4 <i>Fitting</i> delle serie temporali NDVI Sentinel-2.....	33
1.5 <i>Functional Data Analysis</i> (FDA) delle serie temporali NDVI Sentinel-2 fittate.....	35
1.6 Software utilizzati	37
1.6.1 QGIS	37
1.6.2 R.....	37
1.6.3 Google Earth Pro	38
CAPITOLO 2 RISULTATI E DISCUSSIONI:.....	39
2.1 Serie temporali NDVI Sentinel-2 delle aree test e controllo.....	39
2.2 <i>FPCA delle traiettorie temporali Sentinel-2</i>	41
2.3 <i>FPCA delle traiettorie temporali delle tipologie vegetazionali</i>	43
2.4 <i>FPCA per anni nella categoria</i>	47
CAPITOLO 3 CONCLUSIONI	50
CAPITOLO 4 APPENDICE	52

3.1 Schede delle aree test	52
3.3 Tabella manufatti	57
BIBLIOGRAFIA	60

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1-1: Percorrenza nei territori comunali lungo la direttrice di progetto.....	13
Tabella 1-2: Superfici in ettari e percentuale delle tipologie vegetazionali e degli habitat in accordo alla carta della vegetazione S.p.a.....	21
Tabella 1-3: Caratterizzazione vegetazionale aree.....	26
Tabella 1-4: Data-set ricavato dai dati Sentinel-2.....	33

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1-1: Inquadramento geografico del metanodotto Rimini-Sansepolcro.....	12
Figura 1-2: Profilo altimetrico del metanodotto Rimini-Sansepolcro ottenuto da Google Earth.....	14
Figura 1-3: Posa di metanodotto in trincea (Ojinaga, 2014).....	14
Figura 1-4: Il metanodotto (in rosso) sulla mappa dei macrobiolcimi d'Itali (a) e sui livelli della variante submediterranea (b).....	15
Figura 1-5: Livelli di continentalità in Italia (a) e nell'area del metanodotto in giallo (b).	16
Figura 1-6: Ombrotipi in Italia (a) e nell'area del metanodotto (in blu) (b)	16
Figura 1-7: (a) Rete Natura 2000 in Italia; (b) Aree Rete Natura 2000 lungo il metanodotto Rimini-Sansepolcro.....	17
Figura 1-8: Attraversamento della ZSC IT5108010 nel comune di Pieve Santo Stefano (AR)	18
Figura 1-9: Attraversamento della ZSC/ZPS IT4090005 nel comune di Sant'Agata Feltria (RI).....	18
Figura 1-10: Attraversamento della SIC/ZPS IT4090033 nel comune di Novafeltria (RI)	19
Figura 1-11: (a) inquadramento geografico del metanodotto; (b) confronto tra il vecchio (blu) e il nuovo (rosso) tracciato del metanodotto	20
Figura 1-12: Confronto tra immagini storiche Google Earth. Sopra l'immagine (06/07/2019) ante operam e sotto (07/07/2021) immagine post operam dove è evidente il tracciato del metanodotto. In bianco i limiti dell'area test e dell'area controllo (area ID_L2_TR5_A1).	22
Figura 1-13: inquadramento geografico del primo tratto del metanodotto; (b) analisi vegetazionale e aree test del primo tratto in accordo con lo studio di impatto ambientale condotto dalla Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017)	23

Figura 1-14: (a) inquadramento geografico del secondo tratto del metanodotto; (b) analisi vegetazionale delle aree test del secondo tratto in accordo con lo studio di impatto ambientale condotto dalla Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017)	24
Figura 1-15: (a) inquadramento geografico del terzo tratto del metanodotto; (b) analisi vegetazionale delle aree test del terzo tratto in accordo con lo studio di impatto ambientale condotto dalla Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017)	24
Figura 1-16: (a) inquadramento geografico del quarto tratto del metanodotto; (b) analisi vegetazionale delle aree test del quarto tratto in accordo con lo studio di impatto ambientale condotto dalla Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017)	25
Figura 1-17: (a) inquadramento geografico del quinto tratto del metanodotto; (b) caratterizzazione vegetazionale e aree test quinto tratto.	25
Figura 1-18: Arbusteto di <i>Salix eleagnos</i> nei pressi degli argini del Marecchia (Saipem S.p.A., 2017)	27
Figura 1-19: Associazione vegetale di <i>Salici Albae</i> - <i>Populetum Nigrae</i> (Saipem S.p.A., 2017)	28
Figura 1-20: Impianto artificiale di conifere sulla SP53 tra Fresciano e Caprile (Toscana) (Saipem S.p.A., 2017)	28
Figura 1-21: Associazione di <i>Aceri obstusati</i> - <i>Quercetum cerridis</i> (Saipem S.p.A., 2017)	29
Figura 1-22: Bosco di roverella ad ovest della Svolta del Podere tra località Il Podere e La Casona (Toscana) (Saipem S.p.A., 2017)	30
Figura 1-23: Interfaccia grafica EO Browser. In blu al centro l'area test ID_L2_TR4_A2.	31
Figura 1-24: Formula utilizzata per il calcolo del Normalizzate Normalized Difference Vegetation Index	32
Figura 1-25: Plottaggio dei dati provenienti da Sentinel-2 nel grafico prodotto in R.....	34
Figura 1-26: Logo Qgis.....	37
Figura 1-27: Logo R.....	37
Figura 1-28: Logo Google Earth.....	38
Figura 2-1: area test ID_L2_TR4_A3. Immagine del 07-07-2021	39
Figura 2-2: Serie temporali NDVI fittate con i vari smoothers. In rosso evidenziata la Loess 0.1.....	40

Figura 2-3: A sinistra il grafico contenente tutte le curve delle aree campionate; (a) Prima componente della FPCA; (b) Seconda componente della FPCA; (c) Terza componente della FPCA.....	41
Figura 2-4: Spazio ridotto di ordinamento fenologico FPCA. Gli Spiderplot mostrano la differenza che intercorre tra le aree test e le aree confronto. T – area test, C – area controllo.	42
Figura 2-5: A sinistra il grafico contenente tutte le curve delle aree controllo; (a) Prima componente della FPCA; (b) Seconda componente della FPCA; (c) Terza componente della FPCA.....	43
Figura 2-6: Spazio ridotto di ordianmento fenologico FPCA. Gli Spiderplot rappresentano le distinte tipologie vegetazionali (le etichette fanno riferimento alla tabella 1-3). Le tipologie vegetazionali hanno differenti variazioni spettrali.	45
Figura 2-7: FPCA per anni delle cerrete subacidofile mesofile.....	47
Figura 2-8: FPCA per anni dell’impianto di conifere.....	47
Figura 2-9: FPCA per anni dei pioppeti golenali.....	48
Figura 2-10: FPCA per anni dei saliceti arbustivi di greto.....	48

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

Proprio come Orson Welles descrive l'enorme, seppur invisibile, potere detenuto dalla stampa per indirizzare il cittadino nelle sue scelte, così anche in Italia è presente un'entità forte dei suoi moltissimi chilometri di estensione, non visibile agli occhi di tutti. Ciò di cui sto parlando sono gli innumerevoli metanodotti che attraversano lo Stivale in lungo e in largo. Ad oggi i metanodotti in Italia coprono una distanza di 32647 chilometri (Snam, 2021). Considerato che la pista (realizzata per scavare ed interrare il metanodotto) ha una sezione (larghezza) media di 20 metri, possiamo stimare che gli impatti prodotti dai metanodotti in Italia interessano una superficie di circa 653 km² (l'equivalente di 130600 campi da calcio) cioè lo 0,2% dell'intero territorio italiano ed il 6,9% di quello marchigiano.

Data la diffusione dei metanodotti in Italia (in termini di lunghezza e superficie), è facile comprendere che la loro realizzazione va ad impattare sulla biodiversità di molteplici ecosistemi. Talvolta i metanodotti interessano o passano in prossimità delle aree Natura 2000. I Siti Natura 2000 sono il principale strumento utilizzato dall'Unione Europea per la conservazione della biodiversità. Istituita ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "Habitat" (Consiglio delle comunità europee, 1992) e della Direttiva 2009/147/CE "Uccelli" (Consiglio delle comunità europee, 2009) per preservare le specie animali e vegetali e gli habitat naturali e semi-naturali a livello comunitario, la rete Natura 2000 è costituita dai Siti di Interesse Comunitario (SIC), dalle Zone Speciali di Conservazione (ZSC) e dalle Zone di Protezione Speciale (ZPS) (Ministero della Transizione Ecologica, 2021).

Obbligo di chi realizza i metanodotti è il completo ripristino delle condizioni (ambientali e della biodiversità) *ante operam* delle aree interessate dalla realizzazione del tracciato dei gasdotti, con riforestazioni, ove necessario, e altri interventi che vadano a ripristinare la vegetazione originaria delle aree naturali e semi-naturali coinvolte dalla realizzazione dell'opera (Snam, 2021). Sin dalla fase di progettazione, solitamente sono condotti studi sul campo per conoscere il territorio attraversato e produrre documenti di riferimento che descrivano le caratteristiche ambientali *ante operam* tramite indagini specialistiche (geognostiche, idrologiche, botaniche, vegetazionali, faunistiche, paesaggistiche, etc.) (Snam, 2021). Le caratterizzazioni ambientali, derivate dagli studi di campo, vanno a comporre analisi

di impatto ambientale a tutto tondo, andando a quantificare l'entità del disturbo non solo sulla vegetazione, ma anche a livello paesaggistico, idrogeologico, di interferenza con eventuali aree della Rete Natura 2000 e di prevenzione incendi (Valentini, et al., 2020). In fase di progettazione il tracciato è scelto tra diverse alternative, con l'obiettivo di evitare o di ridurre al minimo necessario il passaggio in aree antropizzate o in cui è prevista la costruzione di nuovi insediamenti abitativi, in aree di rilevante interesse naturale o culturale, aree archeologiche e in aree geologicamente instabili. Tali valutazioni vengono effettuate nell'ambito della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA), al termine della quale le amministrazioni preposte, sia a livello centrale che locale, rilasciano le autorizzazioni previste dalla normativa vigente (Snam, 2021).

Agli studi condotti *ante operam* fanno seguito scelte progettuali utili a minimizzare gli impatti sull'ambiente e in particolare sulla biodiversità, i ripristini ambientali. ed il monitoraggio degli stessi. I monitoraggi sono necessari per seguire e valutare il processo di rinaturalizzazione dei tracciati dei metanodotti realizzati. La valutazione avviene confrontando le condizioni ambientali originarie (“ante operam”) e le condizioni ambientali dopo i ripristini (“post operam”) nel tempo. Solitamente, le indagini *ante operam* ed i monitoraggi *post operam* sono condotte con studi di campo (es. fitosociologico vegetazionali) (Snam, 2021). Tali indagini, di elevato dettaglio, possono risultare dispendiose, sia in termini economici che di tempo. Ad esempio, il processo di rinaturalizzazione e recupero di una foresta può durare parecchi anni.

Il telerilevamento con la sua capacità di registrare dati in continuo nel tempo offre un importante contributo per la caratterizzazione *ante operam* e per i monitoraggi *post operam*. I dati telerilevati, infatti, possono affiancare ed integrare quelli di campo efficientando i processi di monitoraggio e favorendo un risparmio in termini tempo. Recenti applicazioni del telerilevamento nel contesto della fitosociologia hanno dimostrato che le associazioni vegetali (definite con l'approccio fitosociologico) mostrano variazioni stagionali spettrali rilevabili da remoto (fenologia telerilevata) che facilitano il processo di mappatura e monitoraggio della vegetazione e degli habitat. In particolare, le serie temporali del Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), sono specifiche delle distinte tipologie vegetazionali (Pesaresi, et al., 2020).

Con questa tesi intendiamo studiare le serie temporali (traiettorie) telerilevate di alcune aree che sono state impattate dalla realizzazione di un metanodotto e capire se la metodologia possa essere un valido strumento (complementare a quello di campo) per monitorare da remoto il processo di rinaturalizzazione della vegetazione e quantificare le differenze dalle condizioni

ante operam originarie della vegetazione. Inoltre, in dettaglio vogliamo valutare se i) le associazioni vegetali hanno traiettorie temporali NDVI proprie ed esclusive e quindi è possibile riconoscere una tipologia vegetazionale (associazione vegetale) a partire da una determinata serie storica; ii) se tramite l'analisi di queste traiettorie temporali telerilevate sia possibile stabilire il momento storico nel quale ci è concesso dire che la vegetazione presente è stata completamente ripristinata o ha raggiunto le condizioni originarie *ante operam*.

Capitolo 1

MATERIALI E METODI

1.1 Il metanodotto Rimini-Sansepolcro

Nel presente lavoro di tesi abbiamo analizzato il metanodotto che parte da Rimini e arriva fino a Sansepolcro (Figura 1-1). L'epoca di intervento risale al 2020, anche se in realtà si tratta di un intervento su un metanodotto preesistente che per motivi di vetustà deve essere rinnovato (Ministero dello sviluppo economico, 2017). Nel nostro caso studio, sono stati riutilizzate le aree del tracciato già interessate dal vecchio metanodotto, anche se non tutto è stato mantenuto come in passato; infatti, si è passati da una lunghezza complessiva di 74.51 km del vecchio impianto ai 75.62 km del nuovo (Luini, et al., 2018).



Figura 1-1: Inquadramento geografico del metanodotto Rimini-Sansepolcro

Il metanodotto interessa la regione Emilia-Romagna per 47.5 km mentre i restanti 28.12 km ricadono nel territorio toscano attraversa 2 province (Arezzo e Rimini) e ben 13 comuni in totalità. I dettagli sono riportati in Tabella 1.1.

Tabella 1-1: Percorrenza nei territori comunali lungo la direttrice di progetto (Luini, et al., 2018)

Regione	Provincia	Comune	Da Km	A Km	Percorrenza (km)
Emilia-Romagna	Rimini	Rimini	0	1,145	1,145
		Sant’Arcangelo di Romagna	1,145	4,645	3,5
Emilia-Romagna	Rimini	Verucchio	4,645	14,025	9,38
Emilia-Romagna	Rimini	San Leo	14,025	22,09	8,065
Emilia-Romagna	Rimini	Novafeltria	22,09	24,76	2,67
Emilia-Romagna	Rimini	Talamello	24,76	26,175	1,415
Emilia-Romagna	Rimini	Maiolo	26,175	28,415	2,24
Emilia-Romagna	Rimini	Novafeltria	28,415	28,7	0,285
Emilia-Romagna	Rimini	Maiolo	28,7	29,525	0,825
Emilia-Romagna	Rimini	Novafeltria	29,525	30,82	1,295
Emilia-Romagna	Rimini	Maiolo	30,82	31,87	1,05
Emilia-Romagna	Rimini	Pennabilli	31,87	35,785	3,915
Emilia-Romagna	Rimini	Sant’Agata Feltria	35,785	36,58	0,795
Emilia-Romagna	Rimini	Pennabilli	36,58	39,105	2,525
Emilia-Romagna	Rimini	Sant’Agata Feltria	39,105	41,555	2,45
Toscana	Arezzo	Badia Tedalda	41,555	45,135	3,58
Emilia-Romagna	Rimini	Castel delci	45,135	51,08	5,945
Toscana	Arezzo	Badia Tedalda	51,08	62,76	11,68
Toscana	Arezzo	Pieve Santo Stefano	62,76	72,655	9,895
Toscana	Arezzo	Sansepolcro	72,655	75,615	2,96
TOTALE					75,615

Per la maggior parte della sua estensione il metanodotto attraversa la Valmarecchia, antica valle che scende dall'Alpe della Luna, percorre un'area del comune di Badia Tedalda, in Toscana, e arriva alla foce del Marecchia nell'area urbana di Rimini. La Valmarecchia è ricca di luoghi d'interesse storico ed archeologico. Tra questi, le torri di segnalazione di epoca romana, che sorgevano a distanza visiva ed alcune ancora presenti, specie su alcune alture. Nella Valmarecchia le valli sono caratterizzate da scarpate o cadute intervallate da sviluppi rocciosi fortemente modellati dagli agenti atmosferici. Le formazioni marnose lasciano qui il posto alle argille scagliose da cui emergono formazioni rocciose alte e ritagliate, denominate “alloctoni”, formate soprattutto di gradimenti e di argille (Bassetti , 2003). L’analisi geografica del nostro metanodotto non poteva definirsi completa senza un profilo altimetrico che

spiegasse il suo sviluppo altitudinale; dalla Figura 1-2 è possibile comprendere che i principali rilievi sono riscontrabili nell'entroterra toscano, quando il metanodotto attraversa la dorsale appenninica, man mano che ci avviciniamo alla costa romagnola invece vediamo una graduale diminuzione dell'altitudine, spiegata dal fatto che il metanodotto segue il corso del fiume Marecchia, intersecandolo più volte.

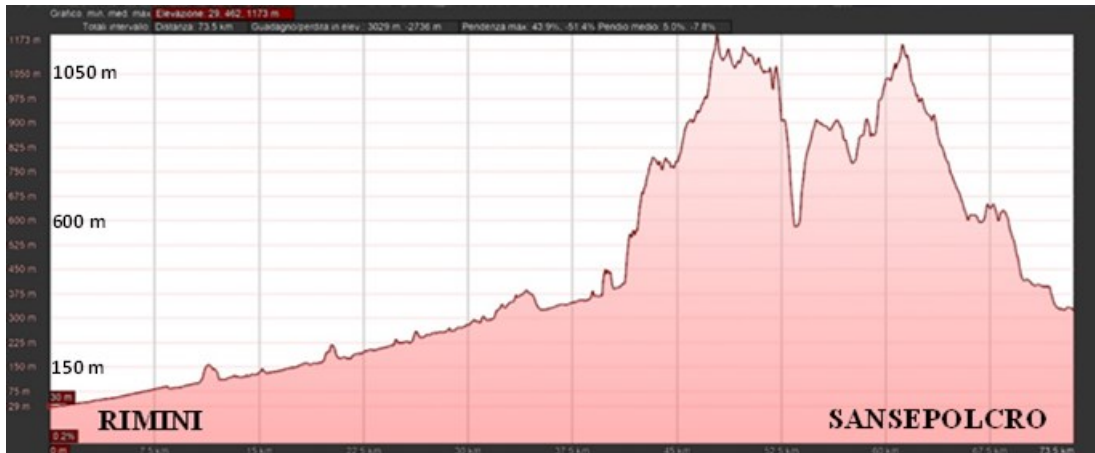


Figura 1-2: Profilo altimetrico del metanodotto Rimini-Sansepolcro ottenuto da Google Earth

1.1.1 Quadro progettuale dei metanodotti

Tornando al tema metanodotto, esso consiste essenzialmente in una tubazione di 75 centimetri di diametro, interrata in almeno 90 centimetri di suolo, facile immaginarsi quindi che il disturbo vegetazionale ricopre una parte importante in questo tema, ma non è l'unica parte "lesa", basta pensare ad esempio al tratto fluviale e ai numerosi attraversamenti che vedono coinvolti sia gli argini che il letto del fiume stesso (Valentini, et al., 2020)



Figura 1-3: Posa di metanodotto in trincea (Ojinaga, 2014)

Quando si parla di messa in posa di un metanodotto però il discorso è molto più ampio di una semplice condotta in acciaio rivestita in polietilene estruso ad alta densità; infatti, bisogna tenere in considerazione tutti gli altri aspetti realizzativi che di conseguenza devono essere rispettati affinché il metanodotto possa essere interrato e reso funzionante. Quello di cui sto parlando sono in primis le aree di passaggio create intorno al metanodotto, esse comprendono tutte quelle aree dove avverranno le operazioni di scavo della trincea, di saldatura dei tubi e di rinterramento; mediamente tali aree vanno da un minimo di 20 metri di larghezza, fino ad un massimo di 28 metri se siamo in luoghi che consentono tale dimensione. Oltre ciò sono presenti sul tracciato gli impianti e i punti di linea, ossia tutte quelle costruzioni permanenti eseguite al di sopra del metanodotto che permettono di controllare i parametri del gas in zone dove due tratte distinte di metanodotti vanno ad intersecarsi (Luini, et al., 2018).

All'interno dell'analisi di impatto preventiva occupa una parte molto importante della relazione l'elencazione dei manufatti che vengono creati qualora il metanodotto intersechi ad esempio corsi d'acqua o strade. Tali opere vanno ad aggiungersi alle altre opere di scasso e interrimento del metanodotto. Per portare un esempio tangibile di quanto affermato è possibile visualizzare la sezione 4.3 dell'appendice che mostra i manufatti creati nel metanodotto Rimini-Sansepolcro (Luini, et al., 2018).

1.1.2 Caratterizzazione bioclimatica

Per la caratterizzazione bioclimatica del metanodotto, in accordo alla classificazione bioclimatica di Rivas-Martinez (Rivas Martinez, et al., 2011) è stata utilizzata la mappa bioclimatica d'Italia (Pesaresi et al., 2017). Il tracciato del metanodotto ricade all'interno del macrobioclima temperato (Figura 1-4 a) di cui metà nella variante bioclimatica

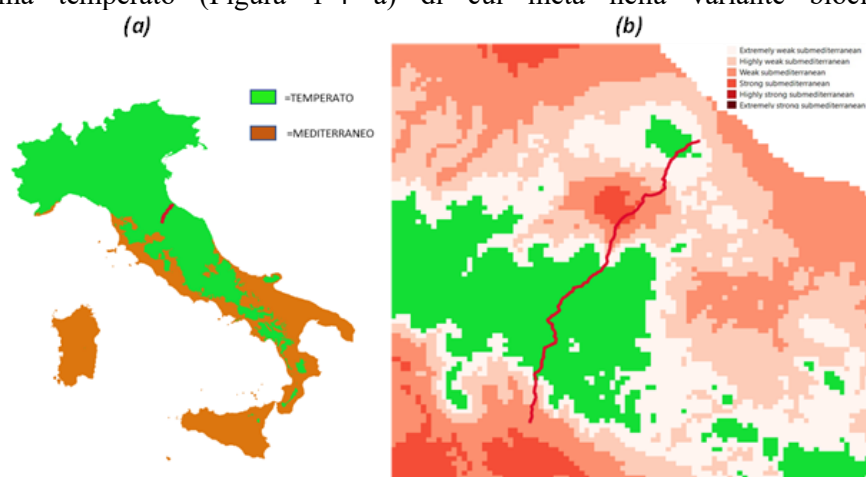


Figura 1-4: Il metanodoto (in rosso) sulla mappa dei macrobioclimi d'Italia (a) e sui livelli della variante submediterranea (b).

submediterranea (caratterizzata, cioè, da un periodo di aridità estiva inferiore a 2 mesi) e con diversi livelli di submediterraneità (Figura 1-4).

Per quanto riguarda i tipi di continentalità, il metanodotto si trova frazionato tra una continentalità oceanica semicontinentale debole nella parte dell'entroterra toscano e una continentalità di tipo oceanica semicontinentale forte (dalla dorsale appenninica fino a Rimini). La continentalità è stabilita sulla base dell'indice di continentalità I_c espresso appunto come $I_c = T_{max} - T_{min}$ (C°) e cioè la differenza tra il mese più caldo (la massima della temperatura mensile media climatologica) e il mese più freddo climatologico (la minima della temperatura mensile media) (Rivas Martinez, et al., 2011) .

Gli ombrotipi sono tre: i) ombrotipo subumido inferiore nell'area compresa tra la dorsale appenninica e la costa emiliana; ii) subumido superiore nell'entroterra, più precisamente nelle

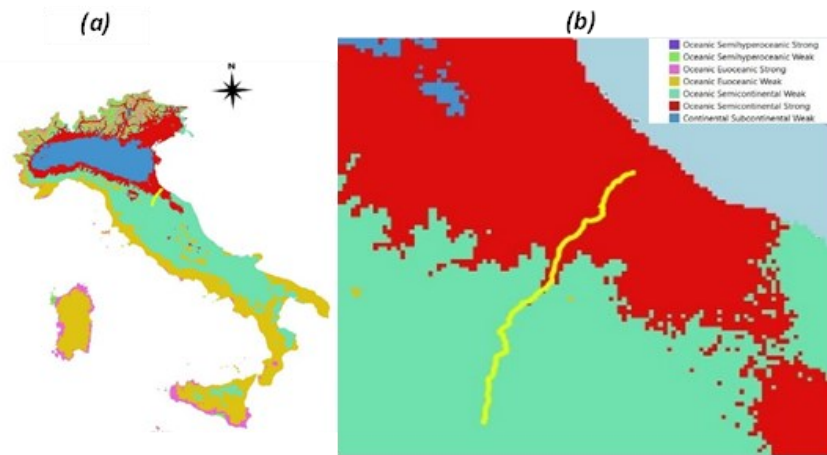


Figura 1-5: Livelli di continentalità in Italia (a) e nell'area del metanodotto in giallo (b). aree a ridosso dei rilievi appenninici; iii) ed infine l'ombrotipo umido inferiore identificabile sulle montagne della dorsale appenninica (Figura 1-5). La classificazione dell'ombrotipo è stata eseguita determinando l'indice ombrotermico I_o , ossia $I_o = (Pp / Tp) \times 10$ cioè il

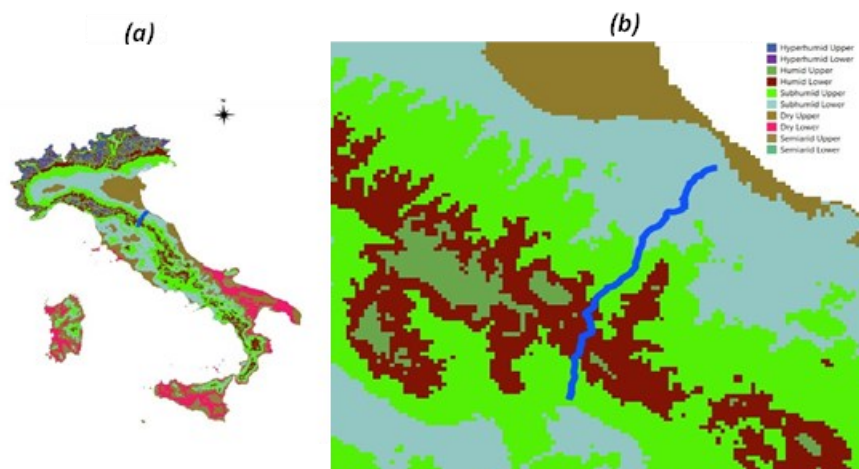


Figura 1-6: Ombrotipi in Italia (a) e nell'area del metanodotto (in blu) (b)

quoziente tra la somma delle precipitazioni medie in millimetri dei mesi la cui temperatura media è superiore a zero gradi Celsius (P_p) e la somma delle temperature medie mensili superiori a zero gradi Celsius in decimi di grado (T_p) (Rivas Martinez, et al., 2011).

1.1.3 Aree Rete Natura 2000

Il metanodotto oggetto di studio attraversa o passa in prossimità di siti della Rete Natura 2000 ad elevata importanza ecologica e conservazionistica. La Rete Natura 2000 è il principale strumento della politica dell'Unione Europea per la conservazione della biodiversità (Ministero della Transizione Ecologica, 2021). Si tratta di una rete ecologica diffusa su tutto il territorio dell'Unione, istituita ai sensi della Direttiva 92/43/CEE "Habitat" per garantire il mantenimento a lungo termine degli habitat naturali e delle specie di flora e fauna minacciati o rari a livello comunitario. La Rete Natura 2000 è costituita dai Siti di Interesse Comunitario (SIC), identificati dagli Stati Membri secondo quanto stabilito dalla Direttiva Habitat, che vengono successivamente designati quali Zone Speciali di Conservazione (ZSC), e comprende anche le Zone di Protezione Speciale (ZPS) istituite ai sensi della Direttiva 2009/147/CE "Uccelli" concernente la conservazione degli uccelli selvatici. Le aree che compongono la Rete Natura 2000 non sono riserve rigidamente protette dove le attività umane sono escluse; la Direttiva Habitat intende garantire la protezione della natura tenendo anche "conto delle esigenze economiche, sociali e culturali, nonché delle particolarità regionali e locali" (Art. 2). Soggetti privati possono essere proprietari dei siti Natura 2000, assicurandone una gestione sostenibile sia dal punto di vista ecologico che economico (Ministero della Transizione Ecologica, 2021). Ad oggi le aree Rete Natura 2000 occupa sul suolo italiano una superficie

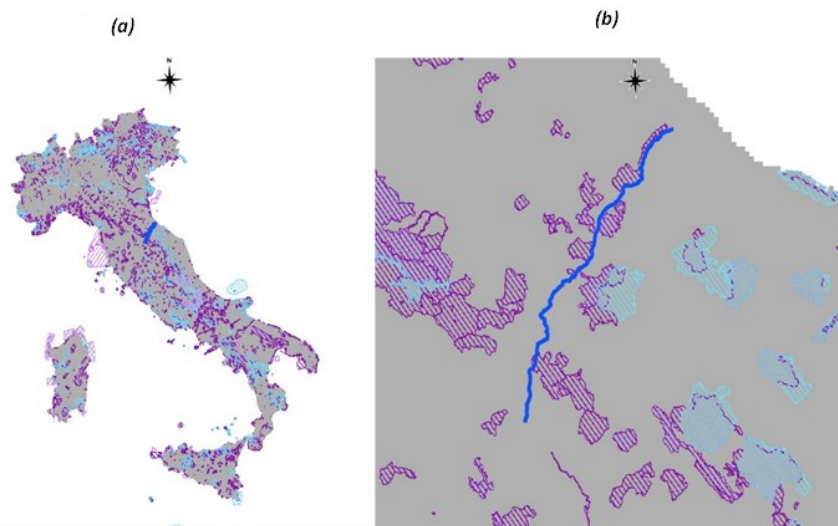


Figura 1-7: (a) Rete Natura 2000 in Italia; (b) Aree Rete Natura 2000 lungo il metanodotto Rimini-Sansepolcro

di circa 5.844.708 ettari, suddivisi in 2637 siti sparsi nelle varie Regioni, in parole povere un 20% del suolo italiano è destinato ad aree Rete Natura 2000; se teniamo in considerazione che tale progetto tutela anche la superficie a mare, dovremmo aggiungere al nostro calcolo altri 2.071.689 ettari, ossia il 13.5% di tutta la superficie a mare riconosciuta all'Italia (Ministero della Transizione Ecologica, 2021).

Pertanto, affinché si avesse un quadro completo di quella che è l'impatto ambientale operato dal metanodotto in termini di disturbo delle realtà delle aree con particolari restrizioni a livello ambientale, al fine di capire quale sarebbe stato il miglior intervento in ottica di ripristino della vegetazione, è stata eseguita anche una classificazione che andasse ad evidenziare le aree che ricadono nella Rete Natura 2000. La Figura 1-7 mostra la Rete Natura 2000 in Italia e nel contesto del metanodotto indagato. Le aree della Rete Natura 2000 attraversate o in prossimità del metanodotto sono: la ZSC IT5108010 nel comune di Pieve Santo Stefano in Toscana (attraversamento di circa 3 km, Figura 1-8). Per quanto riguarda l'Emilia invece abbiamo un attraversamento nel comune di Sant'Agata Feltria e Pennabilli

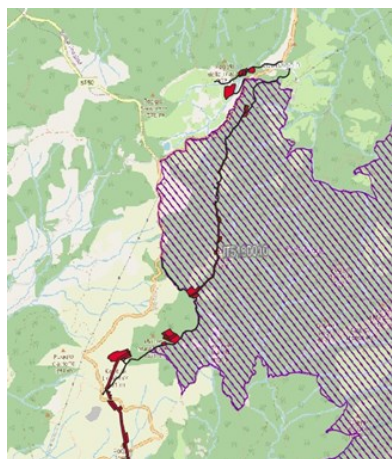


Figura 1-8: Attraversamento della ZSC IT5108010 nel comune di Pieve Santo Stefano (AR)

(Figura 1-9) della ZSC/ZPS IT4090005 per un totale di 1,3 Km, suddivisi per l'appunto in 1,1 Km nel comune di Sant'Agata Feltria e 200 m circa nel Comune di Pennabilli.



Figura 1-9: Attraversamento della ZSC/ZPS IT4090005 nel comune di Sant'Agata

L'attraversamento maggiore (circa 3,8 Km) è nel Comune di Novafeltria, ed interessa la SIC/ZPS IT4090033 (Figura 1-10).

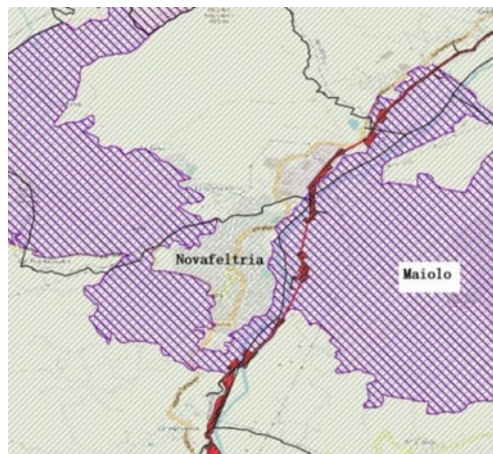


Figura 1-10: Attraversamento della SIC/ZPS IT4090033 nel comune di Novafeltria (RI)

L'ultimo attraversamento riguarda i Comune di Verrucchio e Poggio Torriana, in questo caso il passaggio del metanodotto lambisce la SIC/ZPS IT4090033 per 2,2 Km circa. In tutte le immagini è possibile vedere in rosso il passaggio del metanodotto, mentre le zone a righe viola rappresentano l'ubicazione delle aree della Rete Natura 2000.

Non sono state eseguite particolari discussioni riguardo il passaggio del metanodotto in aree Rete Natura 2000 perché tale caratterizzazione ambientale è stata redatta tenendo in considerazione che il metanodotto avesse già in atto al momento della prima disposizione determinate servitù e al momento del rinnovamento sono state mantenute tali; pertanto, la presenza di zone con determinati caratteristiche conservative serve solo ad indicarci la strada perseguibile in ottica di ripristino futuro semmai tali servitù dovessero decadere o se il percorso del metanodotto subisse delle modifiche.

1.1.4 Caratterizzazione vegetazionale

La ricerca di informazioni vegetazionali sull'area interessata dal metanodotto è stata eseguita in due momenti, in principio sono stati presi in esame i layer cartografici disponibili sui portali regionali: emiliano (Regione Emilia-Romagna, 2008) e toscano (Regione Toscana, s.d.). Le informazioni derivate, però, hanno mostrato due problematiche principali: i) facevano riferimento ad un anno troppo antecedente la nostra analisi; ii) il dettaglio con cui venivano indicate le distinte tipologie di copertura vegetale era troppo basso.

Informazioni utili e necessarie a questo studio sono state reperite con lo studio della vegetazione prodotte per lo studio di impatto ambientale (Saipem S.p.A., 2017). Come già accennato infatti la Saipem S.p.a. esegue analisi in campo per redigere una documentazione che certifichi a pieno il quadro ambientale *ante operam*.

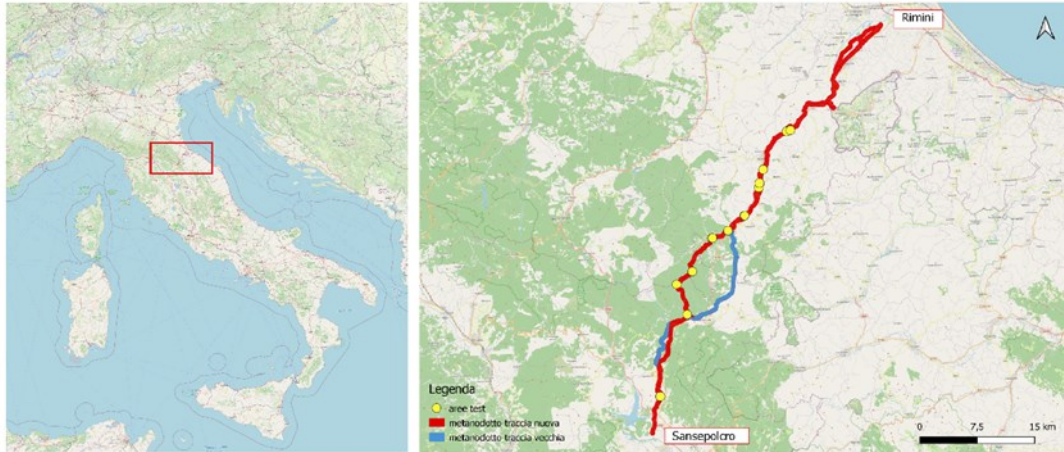


Figura 1-11: (a) inquadramento geografico del metanodotto; (b) confronto tra il vecchio (blu) e il nuovo (rosso) tracciato del metanodotto

Di seguito sono riportate le superfici (in ettari e percentuale) delle tipologie vegetazionali definite dall'analisi vegetazionale espressa nell'analisi di impatto ambientale della Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017) e dei relativi habitat (Consiglio delle comunità europee, 1992) (Tabella 1-2). È possibile notare una forte componente antropizzata osservando la presenza di seminativi e prati destinati al pascolo, con essi abbiamo già descritto il 30% della totalità della vegetazione presente lungo il metanodotto; questo è da imputare soprattutto alla fascia di pianura presente in Emilia-Romagna fortemente incentrata sull'agricoltura, tale porzione di suolo infatti accoglie più del 70 % circa di tutto il metanodotto.

Tabella 1-2: Superfici in ettari e percentuale delle tipologie vegetazionali e degli habitat derivata dall'analisi vegetazionale relativa allo studio di impatto ambientale della Saipem S.p.A.

Tipologia vegetazionale	area (ha)	%	H_N2000
Cerreta subacidofila mesofila	1576,8	27,34	
Coltivi	1176,9	20,41	
Prati da sfalcio	519,2	9,00	6510
Medicai ed erbai	387,5	6,72	
Pioppeti golenali	261,3	4,53	92A0
Querceti a roverella neutrobasifili	198,2	3,44	91AA
Praterie mesoxeriche	157,1	2,72	6210
Verde pubblico e privato, vivai	133,4	2,31	
Sistemi rurali complessi	123,6	2,14	
Pascoli intensivi	119,5	2,07	
Ostietri	113,6	1,97	
Vegetazione ruderale	102,1	1,77	
Vigneti	100,6	1,74	
Robineti	87,1	1,51	
Vegetazione dei banchi limosi fluviali	85,4	1,48	3270
Impianti di conifere	74,2	1,29	
Cespuglieto a <i>Spartium junceum</i>	69,8	1,21	
Saliceti arbustivi di greto	65,5	1,14	3240
Siepi e filari di querce	63,6	1,10	
Ginepreti	55,9	0,97	5130
Frutteti	55,1	0,96	
Uliveti	43,7	0,76	
Cespuglieti misti con <i>Cornus sanguinea</i>	33,8	0,59	
Formazioni calanchive	30,9	0,54	
Faggeta eutrofica	29,9	0,52	9210
Impianti di latifoglie	29,7	0,51	
Cespuglieti con salici di greto e <i>Spartium junceum</i>	22,6	0,39	3240
Vegetazione ad <i>Arundo pliniana</i>	13	0,23	
Formazioni a rovo	11,2	0,19	
Greti nudi	11,1	0,19	
Vegetazione pioniera dei greti	8,6	0,15	
Canneti	3,7	0,06	
Saliceto a salice bianco e ontanete ripariali	1,6	0,03	91E0
Bosco di forra con acero	1,2	0,02	

1.2 Aree test

Per la scelta delle aree da analizzare con le serie temporali tele-rilevate, abbiamo eseguito un'analisi visiva ed interpretativa delle immagini satellitari (ad elevata risoluzione circa 0.5 m) disponibili su Google Earth Pro (Google, sf). In particolare, la funzione “mostra immagini storiche”, ha permesso di identificare appropriate immagini che mettono in evidenza chiaramente le situazioni *ante* e *post operam* determinate dalla realizzazione del metanodotto (es. vedi Figura 1-12).



Figura 1-12: Confronto tra immagini storiche Google Earth. Sopra l'immagine (06/07/2019) ante operam e sotto (07/07/2021) immagine post operam dove è evidente il tracciato del metanodotto. In bianco i limiti dell'area test e dell'area controllo (area ID_L2_TR5_A1).

La selezione delle aree è stata condotta in maniera tale da ottenere un campione di dimensioni adeguate e ben distribuito lungo il metanodotto (la distribuzione complessiva è visibile in figura 1-1). In totale sono state individuate 15 aree lungo il corso del metanodotto. In ogni area è stata identificata l'area interessata dal passaggio del metanodotto (definita “Area Test”) ed un'area, invece, che non è stata interessata dal disturbo (definita “Area Controllo”). Quest'ultima, rappresenta il riferimento nel tempo per valutare lo stato di ripristino dell'area test. Nei tratti più ampi e aperti dove passa il metanodotto, sono state campionate due aree

confronto proprio perché la conformazione territoriale ne permetteva la fattibilità, in modo tale da avere un riscontro delle analisi più robusto. Con la procedura di campionamento abbiamo ottenuto un totale di trentasei aree (15 Aree Test + 19 Aree Controllo). Va evidenziato che siamo venuti a conoscenza dell'analisi vegetazionale presente nello studio di impatto ambientale (Saipem S.p.A., 2017) in una fase avanzata di questo studio. Pertanto, la carta non è stata direttamente utilizzata per la scelta delle aree ma, in ambiente GIS, ci ha permesso di caratterizzare (attribuire) la tipologia vegetazionale alle aree test e controllo. L'analisi vegetazionale (Saipem S.p.A., 2017) è suddivisa in cinque tratti "tranci" è riportata alle figure (1-12;1-13;1-14;1-15;1-16). Di seguito sono riportate le immagini della localizzazione delle aree test nei distinti tratti (tranci) del metanodotto.

Nel primo tratto del metanodotto (trancio 1), sono state selezionate 2 aree (Figura 1-13). Questo segmento di metanodotto riguardava l'entroterra toscano e da come si può vedere in legenda è caratterizzato principalmente da cerrete alternate a campi di vegetazione arbustiva e superfici agricole. Le aree test campionate in questo tratto prendono in esame una cerreta subacidofila mesofila ed un impianto di conifere.

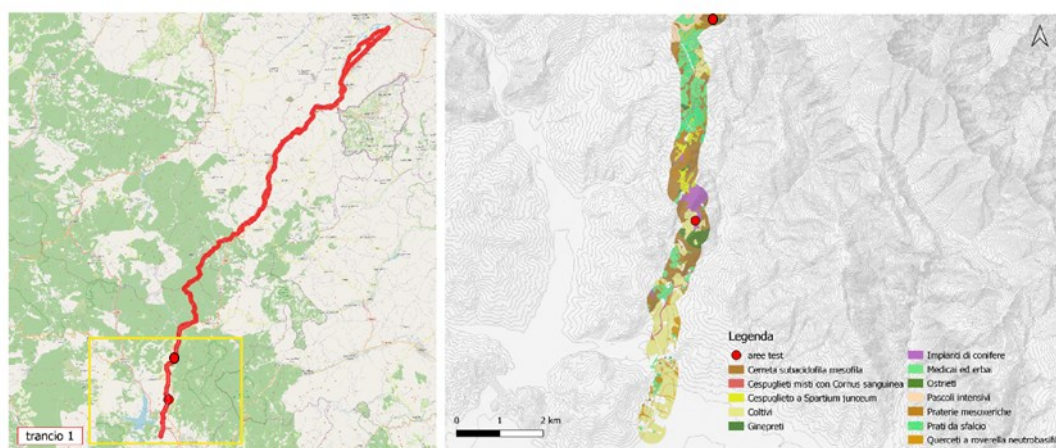


Figura 1-13: inquadramento geografico del primo tratto del metanodotto; (b) analisi vegetazionale e aree test del primo tratto in accordo con lo studio di impatto ambientale condotto dalla Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017)

Nel secondo tratto (Figura 1-14) sono state selezionate 5 aree test. Questo tratto del metanodotto era quello caratterizzato dalle quote più elevate (1173 m s.l.m.) ed è caratterizzato soprattutto da cerrete; infatti, è possibile vedere nella legenda una maggioranza di cerrete subacidofile mesofile. Il settore settentrionale di questo tratto interessa il corso del fiume Marecchia ed è caratterizzato dalla vegetazione ripariale composta da pioppeti e saliceti. Vista

la percorrenza del metanodotto lungo il corso del fiume, il maggior numero di aree test è stato selezionato nei pressi del corso fluviale.

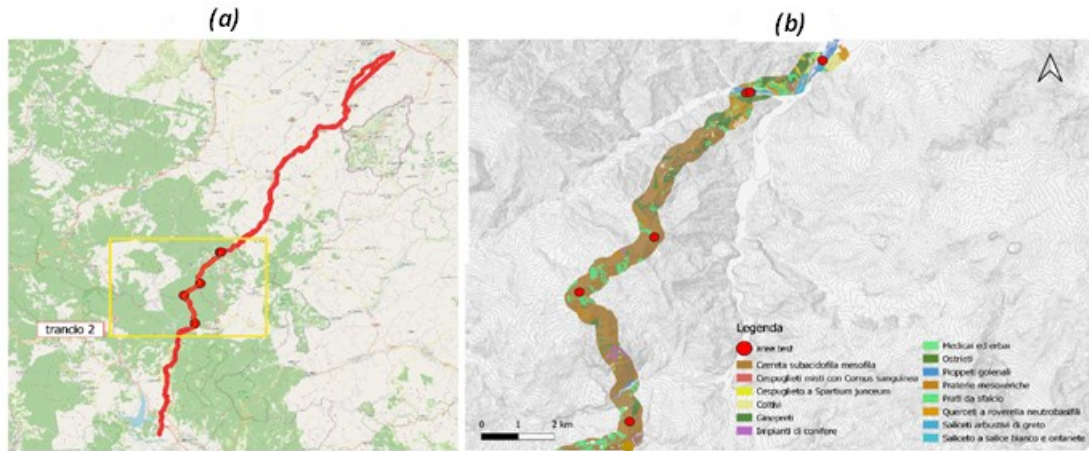


Figura 1-14: (a) inquadramento geografico del secondo tratto del metanodotto; (b) analisi vegetazionale delle aree test del secondo tratto in accordo con lo studio di impatto ambientale condotto dalla Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017)

Nel terzo tratto sono state selezionate 7 aree test tutte posizionate nei pressi del fiume con vegetazione attribuibile ai pioppeti golenali e ai saliceti arbustivi di greto (Figura 1-15). Le aree fluviali sono ecosistemi particolarmente dinamici che ci permettono di testare la validità della metodologia proposta.

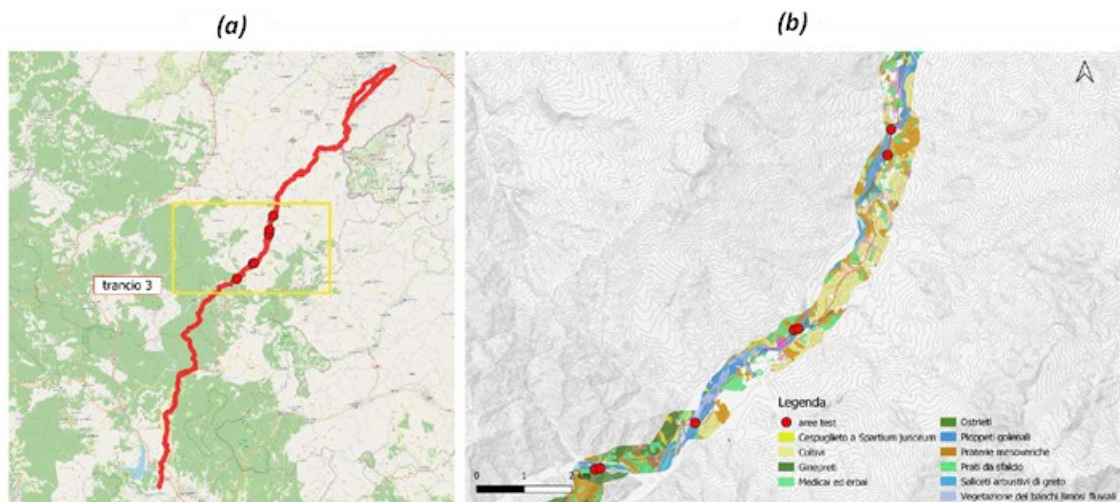


Figura 1-15: (a) inquadramento geografico del terzo tratto del metanodotto; (b) analisi vegetazionale delle aree test del terzo tratto in accordo con lo studio di impatto ambientale condotto dalla Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017)

Nel quarto tratto sono state selezionate 2 aree test, in questo segmento ancora prevale la vegetazione ripariale, ma vista la presenza di un tessuto urbano sviluppato e della presenza di seminativi lungo il corso del fiume, non è stato possibile selezionare un numero maggiore di aree test (Figura 1-16).

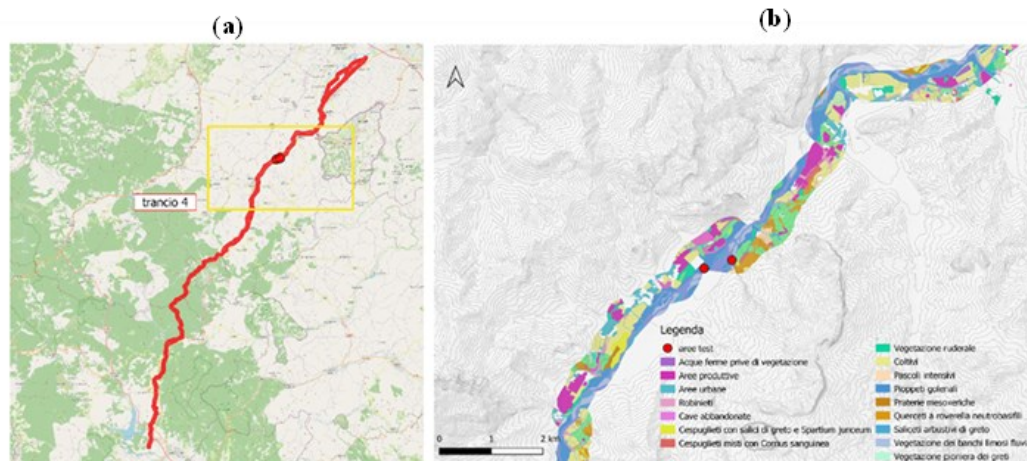


Figura 1-16: (a) inquadramento geografico del quarto tratto del metanodotto; (b) analisi vegetazionale delle aree test del quarto tratto in accordo con lo studio di impatto ambientale condotto dalla Saipem S.p.a. (Saipem S.p.A., 2017)

Nel quinto tratto (Figura 1-17) non sono presenti aree test. Questo tratto (nei pressi di Rimini) è, perlopiù, caratterizzata da aree urbane e aree coltivate (es. frutteti e vigneti).

Come sopra menzionato la carta della vegetazione non è stata utilizzata per la scelta delle aree. Per tali ragioni le aree test campionate comprendono solo una parte delle tipologie

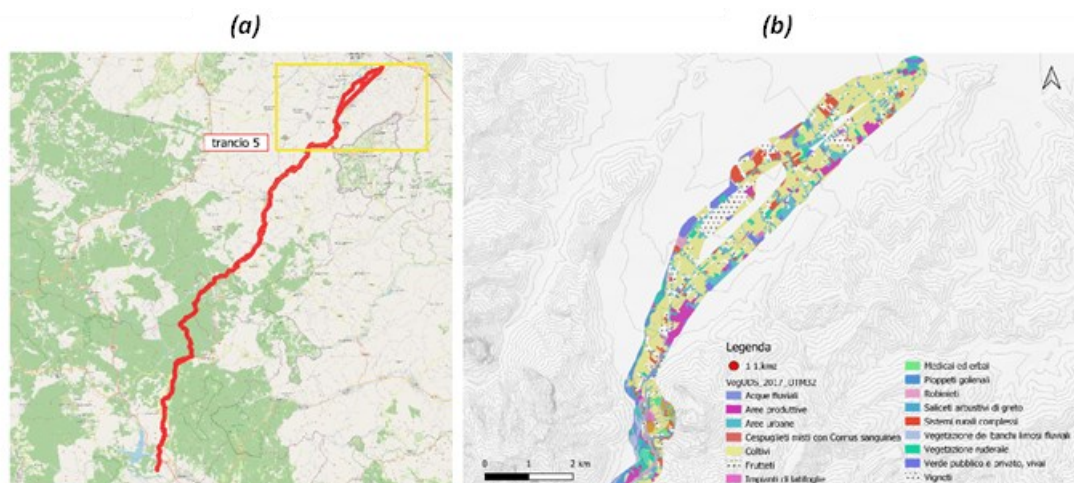


Figura 1-17: (a) inquadramento geografico del quinto tratto del metanodotto; (b) caratterizzazione vegetazionale e aree test quinto tratto.

vegetazionali presenti sulla carta. Ciononostante, quelle considerate riflettono le proporzioni (vedi Tabella 1-2 e Tabella 1-3). Ad esempio, le cerrete subacidofile mesofile sono presenti nelle aree test per un 33% e nella carta della vegetazione sono presenti per un 27%, cioè valori piuttosto simili.

In Tabella 1-3 sono riportate le frequenze delle tipologie vegetazionali nelle aree.

Tabella 1-3: Caratterizzazione vegetazionale aree

Tipologia vegetazionale	n. Aree	%	Label assegnata
Pioppeti golenali	13	36,1	P
Cerrete subacidofila mesofila	12	33,3	C
Querceti a roverella neobasifili	1	2,8	Q
Impianti di conifere	2	5,6	I
Saliceti arbustivo di greto	8	22,2	S
TOTALE	36	100,0	

SALICETI ARBUSTIVI DI GRETO

Nelle aree in cui si verifica una certa stabilizzazione del sistema fluviale, la vegetazione erbacea viene sostituita dalla vegetazione arbustiva a dominanza di salici. Sui suoli ghiaiosi e ciottolosi prevale il salice ripaiolo (*Salix eleagnos*), mentre sui suoli con matrice fine si ha una dominanza di salice rosso (*Salix purpurea*). A questi si alternano giovani individui di pioppo nero, bianco e canescente, assieme ad un corteggio di specie erbacee. Lungo un greto così dinamico come quello del fiume Marecchia, è possibile osservare, in realtà, tutti gli stati di ricolonizzazione ed evoluzione dal greto nudo, ai saliceti arbustivi fino ad arrivare ai pioppeti più maturi. Tale tipologia vegetazionale è riconducibile all'associazione vegetale *Salicetum incano-purpureae*, anche nella variante con *Salix purpurea* dominante. Questi arbusteti corrispondono all'habitat di interesse comunitario "3240: Fiumi alpini con vegetazione riparia legnosa a *Salix eleagnos*" (vedi Figura 1-18). I saliceti arbustivi di greto si sviluppano in maniera continua lungo il fiume Marecchia. Essi però presentano delle variazioni progressive nella composizione: nella parte montana dominano *Salix eleagnos* e alcune altre specie più mesofile, mentre nella porzione basso collinare e pianiziale prende il sopravvento *Salix purpurea* e aumenta il contributo delle specie ruderali. Va evidenziato che giovani salici e pioppi sono presenti anche nella vegetazione pioniera dei greti, oltre che in quella limosa. Infatti, questi tipi di vegetazione presentano dinamiche anche veloci, facendo parte del sistema

ecologico del greto attivo. Questi arbusteti sono ben rappresentati nell'area di indagine ed occupano quindi una significativa superficie pari a 65,50 ha (Saipem S.p.A., 2017).



Figura 1-18: Arbusteto di *Salix eleagnos* nei pressi degli argini del Marecchia (Saipem S.p.A., PIOPPETI GOLENALI

I boschi ripariali a dominanza di pioppo rappresentano la tipologia di vegetazione golenale più diffusa lungo il corso del fiume Marecchia. Tra le specie arboree domina il pioppo nero a cui si accompagnano il pioppo canescente, il pioppo bianco e, occasionalmente, il salice bianco. (vedi Figura 1-19). Inoltre, questi boschi presentano stadi più giovani e dinamici in cui, ai salici arbustivi si accompagnano stadi più maturi dove entrano anche altre specie di latifoglie più esigenti e, nei contesti più degradati, quale la robinia. I pioppeti golenali sono ben diffusi nel territorio analizzato e spesso formano delle quinte boschive continue al margine dell'area fluviale. Essi coprono circa il 5% dell'area indagata. Queste tipologie sono riferibili all'associazione *Salici-Populetum nigrae*. Nelle forme più termofile si possono riscontrare anche lembi di *Populetum albae* Br -Bl. 1931 ex Tchou 1947. Questi boschi sono riconducibili all'habitat di interesse comunitario "92A0: Foreste a galleria di *Salix alba* e *Populus alba*". Nel territorio dell'Emilia-Romagna i pioppeti a pioppo nero sono un tipo di vegetazione che ben caratterizza l'intero corso del Marecchia, ad esclusione di alcuni tratti montani. Questi boschi si sviluppano sia nella parte più interna della fascia del greto attivo sia sui primi terrazzi fluviali; qui, inoltre, si possono osservare specie più esigenti ma anche specie ruderali come la robinia. I pioppeti golenali occupano fasce di diversa larghezza ma anche di notevole lunghezza, separando il sistema fluviale da quello collinare o pianiziale adiacente. In Emilia-Romagna questo tipo di bosco golenale è collegato con i saliceti di greto e ben diffuso lungo tutto il corso fluviale considerato; rappresenta, dopo le cerrete, la cenosi naturale più diffusa nell'area indagata con 261,3 ha (Saipem S.p.A., 2017).



Figura 1-19: Associazione vegetale di Salici Albae - Populetum Nigrae (Saipem S.p.A., 2017)

IMPIANTI DI CONIFERE

Nelle aree montane sono diffusi gli impianti artificiali di conifere che nella maggioranza dei casi sono costituiti da pino nero (*Pinus nigra*) e, solo in minoranza, da altre conifere anche esotiche come il cipresso dell'Arizona (*Cupressus arizonica*). In Emilia-Romagna gli impianti di conifere non autoctone occupano superfici di varie dimensioni e sono frutto di una necessità pregressa di stabilizzare aree con specie frugali ritenute adatte. Essi, quindi, sono legati alle aree alto collinari e montane dove rappresentano nuclei all'interno del paesaggio dominato per lo più dalle cerrete e dei querceti a roverella. Sono presenti sia a monte di Badia Tedalda sia nella parte media del corso del Marecchia, sempre su pendii acclivi. Occupano nel complesso 74,2 ha (Saipem S.p.A., 2017).

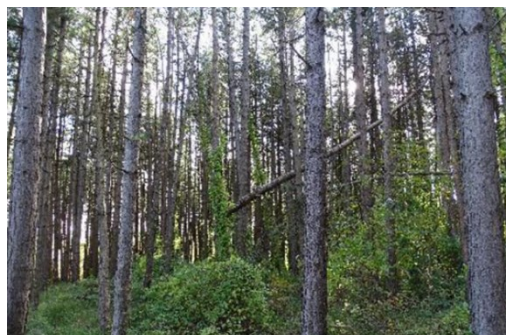


Figura 1-20: Impianto artificiale di conifere sulla SP53 tra Fresciano e Caprile (Toscana) (Saipem S.p.A., 2017)

CERRETE SUBACIDOFILE MESOFILE

Nel piano inferiore rispetto alla faggeta, dominano i boschi mesofili di cerro di tipo subacidofilo. In realtà i boschi di cerro coprono un range altitudinale molto ampio e nelle parti inferiori sono diffusi boschi misti con cerro, più mesoxerici. La struttura di questi boschi è molto variabile in conseguenza alle pratiche silvocolturali e raramente si possono osservare

cerrete molto mature. Questi boschi di querce, nelle diverse varianti individuate, rappresentano l'habitat più diffuso dell'area indagata ricoprendo circa il 27% del territorio, con poligoni ampi e dalla forma spesso compatta (Saipem S.p.A., 2017). Le cerrete possono essere riferite principalmente all'associazione *Aceri obstusati-Quercetum cerridis*(Figura 1-21). Questa, nelle situazioni più mesofile, viene sostituita da *Erythronio dentis-canis-Quercetum cerridis*. Alcuni aspetti possono essere riferiti anche all'associazione *Cephalanthero longifoliae-Quercetum cerridis*. In Toscana le cerrete non sono considerate habitat di interesse comunitario. La cerreta rappresenta la cenosi forestali caratterizzante il paesaggio vegetale al di sotto della faggeta. Questi boschi sono ben rappresentati lungo il tratto Toscano del tracciato a Partire dalla zona del Passo di Viamaggio fino ai rilievi collinari alle Spalle di Sansepolcro. Una tale diffusione induce una articolazione ecologica con cenosi più mesofile alle quote superiori cenosi di collegamenti con i querceti misti a roverella alle quote inferiori. Sono il tipo di vegetazione più rappresentato con ben 1576,8 ha (Saipem S.p.A., 2017).



Figura 1-21: Associazione di Aceri obstusati - Quercetum cerridis (Saipem S.p.A., 2017)

QUERCETI A ROVERELLA NEUTROBASIFILI

Tutta la fascia collinare su substrati non carbonatici è colonizzata dai boschi di roverella (*Quercus pubescens*) e quercia virgiliana (*Quercus virgiliana*) che rappresentano i boschi più diffusi, anche se spesso ridotti a lembi di piccole dimensioni a causa della trasformazione del territorio (vedi Figura 1-22). Si tratta di boschi chiari piuttosto xerici in cui lo strato erbaceo è di solito ben sviluppato. Questi sono diffusi sia sui versanti collinari sia nelle piane alluvionali dove possono entrare in contatto catenale anche con i boschi golenali di pioppo. I boschi dominati da roverella e quercia virgiliana sono ben diffusi in questi sistemi collinari e, all'interno dell'area, ricoprono meno del 3.4% della superficie. I querceti a roverella possono essere riferiti all'associazione più mesofila *Peucedano cervariae-Quercetum pubescentis* e

quelli più termofili all'associazione *Roso semprevirentis-Quercetum pubescentis* e sono inclusi nell'habitat di interesse comunitario "91AA*: Boschi orientali di quercia bianca".

Nella porzione del tracciato in regione Toscana i querceti misti a roverella sono piuttosto rari vista la maggior diffusione delle cerrete. Si tratta di alcuni lembi che si sviluppano nell'area collinare a monte di Sansepolcro sia in posizioni più xeriche rispetto alla cerreta che si trova alle quote inferiori. Occupano 198,2 ha (Saipem S.p.A., 2017).



Figura 1-22: Bosco di roverella ad ovest della Svolta del Podere tra località Il Podere e La Casona (Toscana) (Saipem S.p.A., 2017)

1.3 Serie temporali tele-rilevate

Nella statistica descrittiva, una serie storica (o temporale) si definisce come un insieme di variabili casuali ordinate rispetto al tempo, ed esprime la dinamica di un certo fenomeno nel tempo. Le serie storiche vengono studiate sia per interpretare un fenomeno, individuando componenti di tendenza, di ciclicità, di stagionalità e/o di accidentalità, sia per prevedere il suo andamento futuro (Di Fonzo & Lisi, 2005). In questa tesi per descrivere in maniera quantitativa il comportamento fenologico e le traiettorie temporali delle distinte coperture vegetazionali interessate dal metanodotto sono state prese in esame le serie temporali Sentinel-2 dell'indice NDVI disponibili online con il servizio EO Browser (Sinergise Laboratory for geographical information system, ltd, s.d.) (Figura 1-23). Il periodo preso in esame (dal 1/01/2017 al 30/09/2021) ha un range temporale di 5 anni. Le serie temporali ci permettono di descrivere l'andamento fenologico della vegetazione *ante operam* e la fase iniziale del *post operam*

I dati sono stati ricavati direttamente dal sito di EO Browser (Sinergise Laboratory forgeographical information system, ltd, s.d.) dal quale è possibile attingere alle immagini tele-rilevate del satellite Sentinel-2; importando gli shapefile delle aree realizzate in Google Earth. Selezionando l'indice di vegetazione (es. NDVI) ed il range temporale si ottengono serie temporali 'grezze' (non lisciate), vedi Figura 1-23. Le serie temporali sono esportabili in molteplici formati e riutilizzabili in Excel ed R.

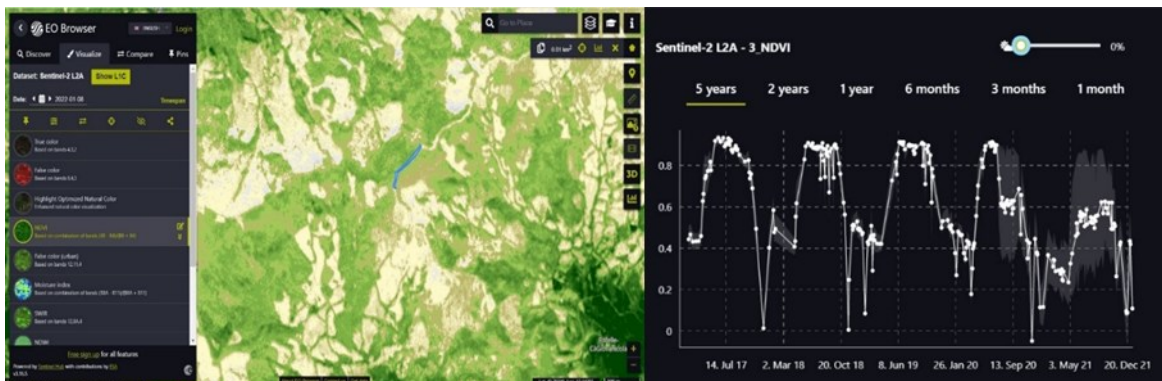


Figura 1-23: Interfaccia grafica EO Browser. In blu al centro l'area test ID_L2_TR4_A2.

Ulteriore facilitazione nella raccolta dati offerta dal sito è di evitare parzialmente i cosiddetti *noise data*. In particolare, è possibile escludere le scene con elevata nuvolosità. In questa tesi abbiamo selezionato immagini completamente sgombre da nuvole. Dalla Figura 1-23 è possibile notare in alto a destra il parametro che sancisce il livello di nuvolosità contenuto all'interno del nostro data-set pari a 0%.

1.3.1 Satellite Sentinel-2

I satelliti digitali appartengono essenzialmente a due tipologie ben definite: sensori multispettrali e sensori iperspettrali. La sostanziale differenza tra queste due definizioni si basa essenzialmente sul livello di risoluzione spettrale delle due tipologie di strumenti. Infatti, parliamo di sensori iperspettrali riferendoci a strumenti dotati di una risoluzione spettrale (numero di bande in cui è suddiviso lo spettro) dell'ordine di un centinaio di bande, quindi capaci di investigare ciascuna regione dello spettro su più bande, mentre nel caso dei sensori multispettrali tale numero non supera la decina, consentendo raramente l'analisi del comportamento spettrale per ciascuna regione dello spettro su più di una sola banda (Simonetti, et al., 2014)

I vettori impiegati nel trasporto di questi sistemi, sono essenzialmente di tre tipi: satelliti, vettori aerei, sistemi di supporti che operano a terra. In linea di massima i sensori multispettrali sono abbinati a vettori satellitari, a differenza dei sensori iperspettrali che vengono montati su piattaforme aerotrasportate in caso di indagini su ampie aree.

Il Sentinel-2, nello specifico, è una missione sviluppata nell'ambito del programma Copernicus per monitorare le aree verdi del pianeta e fornire supporto nella gestione di disastri naturali. Presenta un'acquisizione delle immagini in 13 bande del visibile e infrarosso, con una risoluzione temporale di 5 giorni e un dettaglio al suolo di 10, 20 e 60 metri a seconda della banda dello spettro (Simonetti, et al., 2014).

I dati sono liberamente accessibili. il programma Sentinel-2 è in grado di monitorare lo sviluppo di piante in ambito agricolo o forestale, valutando le variazioni nei livelli di clorofilla e contenuti di acqua. Oltre alla crescita delle piante, Sentinel-2 può essere usato per ottenere informazioni sull'inquinamento dei laghi e delle acque costiere e, in caso di estesi disastri ambientali come allagamenti, eruzioni vulcaniche o smottamenti, è di supporto nella gestione delle emergenze.

1.3.2 *Indice NDVI*

Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è un indicatore grafico che può essere utilizzato per analizzare le misurazioni ottenute dal telerilevamento e valutare se la zona osservata contiene vegetazione e valutarne lo stato fenologico.

L'NDVI utilizza i canali NIR e ROSSO nella sua formula:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Figura 1-24: Formula utilizzata per il calcolo del Normalizzate Normalized Difference Vegetation Index

La vegetazione sana riflette più luce nel vicino infrarosso (NIR) e verde rispetto ad altre lunghezze d'onda, ma assorbe più luce rossa e blu. Questo è il motivo per cui i nostri occhi vedono la vegetazione come il colore verde. Se potessi vedere il vicino infrarosso, allora sarebbe forte anche per la vegetazione. I sensori satellitari come Landsat e Sentinel-2 hanno entrambi le bande necessarie con NIR e rosso. Il risultato di questa formula genera un valore compreso tra -1 e +1. Se si dispone di bassa riflettanza (o valori bassi) nel canale rosso e alta riflettanza nel canale NIR, ciò produrrà un valore NDVI elevato e viceversa (ARPA , 2014).

Nel complesso, NDVI è un modo standardizzato per misurare la vegetazione sana. Quando hai alti valori NDVI, hai una vegetazione più sana. Quando hai un basso NDVI, hai meno o nessuna vegetazione (ARPA , 2014). Fattore importante da tener conto se si vogliono ottenere risultati quanto più affidabili possibile è la correzione atmosferica, come appunto già descritto precedentemente. L'indice NDVI è utilizzato sia in agricoltura, nello specifico dimostra il suo

massimo potenziale in quella di precisione e per il rilevamento della biomassa; nella silvicoltura viene usato l'NDVI per quantificare l'offerta forestale e l'indice della superficie fogliare. Che sia un indice molto importante lo afferma anche la NASA, per l'appunto esso è molto utile per la determinazione della siccità, comunque ad oggi i suoi usi sono molteplici e tutti molto utili (Weier & Herring, 2000).

1.4 *Fitting* delle serie temporali NDVI Sentinel-2

L'analisi delle serie temporali, considerate come branca specifica della più vasta Intelligent Data Analysis, costituisce un rilevante e consolidato argomento di ricerca applicata, occupando aree di indagine diverse. Il rilievo ad intervalli controllati di tempo dei valori registrati da molteplici strumentazioni durante l'evoluzione dinamica di un fenomeno di qualsiasi natura, produce una stringa di valori numerici osservati sequenzialmente, eventualmente anche rappresentabile su un grafico per evidenziarne l'andamento globale. Lo studio delle serie temporali permette di: trovare una più efficace rappresentazione dei dati (*fitting*); eseguire misure di similarità tra serie temporali; classificare i dati, ad esempio per mezzo di algoritmi non supervisionati (*clustering*); prevedere l'evoluzione futura dei fenomeni. L'origine stessa delle serie temporali conduce a ipotizzare che un dato rilevato in un certo istante x sia più simile a quello rilevato all'istante $x-1$ che ad altri dati rilevati in momenti precedenti; in questo senso, si può ritenere che le serie temporali abbiano "memoria di sé" (Del Sorbo, 2011).

Le serie temporali NDVI Sentinel-2 derivate da EO browser (Sinergise Laboratory geographical information system, ltd, s.d.) si presentano nel formato indicato nella Tabella 1-4:

Tabella 1-4: Porzione del Data-set ricavato dai dati Sentinel-2 accessibili con il portale EO browser

Date	Min	Max	Mean	stDev	Median
2016-12-02	0,26621	0,64971	0,50546	0,05514	0,50407
2016-12-22	0,41629	0,81991	0,55332	0,05909	0,54645
2017-01-01	0,37460	0,94386	0,53793	0,07083	0,52743
2017-01-14	0,41516	0,86297	0,57105	0,07042	0,56036
2017-02-20	0,25545	0,60722	0,43484	0,06277	0,43574
2017-03-02	0,26730	0,58972	0,40058	0,04230	0,39972
2017-03-15	0,31470	0,55047	0,43204	0,04053	0,43002
2017-03-25	0,30979	0,55413	0,44554	0,04107	0,44280
2017-04-04	0,35988	0,64276	0,51618	0,05935	0,51492
2017-04-14	0,45038	0,82377	0,69368	0,07201	0,70928

I dati sono ordinati temporalmente. Per ciascuna data sono riportati i valori NDVI massimi, minimi, medi, deviazione standard e la mediana dell'area target (test o controllo). Al fine di capire il comportamento nel corso del tempo del nostro indice abbiamo preso in considerazione il valore mediano. In *R* (tramite apposito script) è stato possibile plottare le serie temporali come nella Figura 1-25.

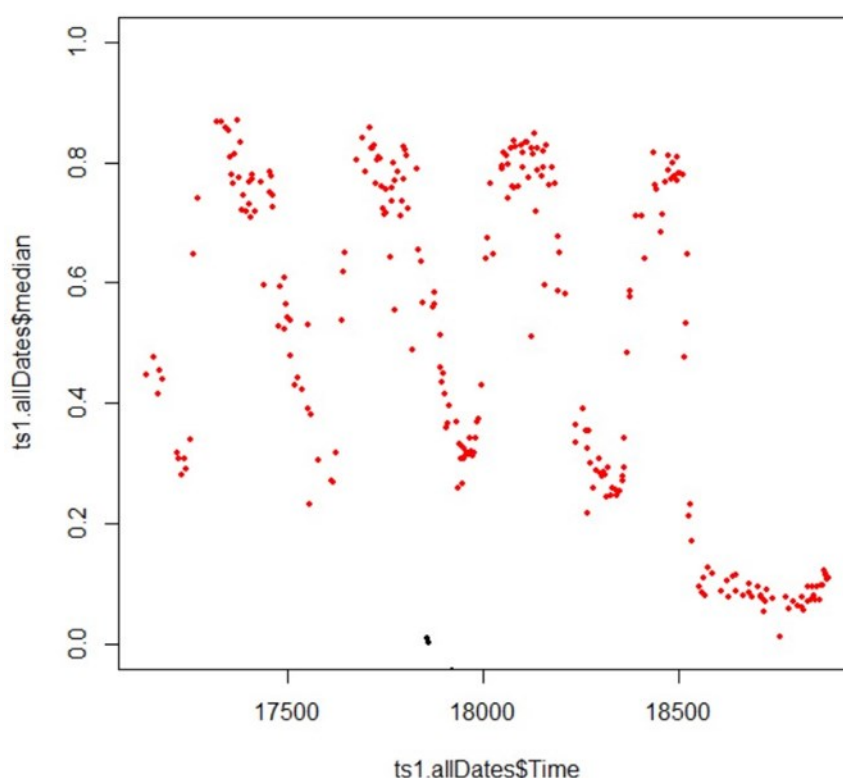


Figura 1-25: Plottaggio dei dati provenienti da Sentinel-2 nel grafico prodotto in *R*

Come sopra menzionato, una fase importante nello studio della serie temporale è rappresentata dal fitting. Una buona interpolazione (fitting) dei dati permette una efficace rappresentazione delle variazioni contenute nella serie temporale stessa. Tra gli strumenti utilizzati nelle applicazioni statistiche, infatti, svolge un ruolo di fondamentale importanza il modello di regressione lineare grazie alla sua semplicità di interpretazione. Negli ultimi anni, a seguito della notevole evoluzione dei computer, in termini di velocità e di prestazione, è stato possibile affiancare al tradizionale modello lineare nuovi metodi che potenzialmente permettono di trarre maggiori informazioni dall'insieme di dati a disposizione dell'analista (Del Sorbo, 2011). Uno di questi metodi è il modello additivo, una generalizzazione del modello di regressione lineare. Il principio su cui esso si basa è sostituire la classica funzione lineare di una covariata con una funzione di Smooth non specificata. Un modello additivo generalizzato (GAM) quindi è un modello in cui il predittore lineare è dato da una somma

specificata dall'utente di funzioni lisce delle covariate più una componente parametrica convenzionale del predittore lineare. In questo studio abbiamo applicato la GAM con differenti “stimatori” (smoothers). Da confronto visivo abbiamo scelto quello più adatto.

Gli smoothers tenuti in considerazione sono stati:

- *Ps*: Ossia le P-spline come proposto da Eilers e Marx (1996). Combinano una base B-spline, con una penalità discreta sui coefficienti di base, ed è consentita qualsiasi combinazione sana di penalità e ordine di base. Sebbene questa penalità non abbia un'interpretazione esatta in termini di forma della funzione, nel modo in cui lo fanno le penalità derivate, le spline P si comportano quasi come le spline convenzionali in molte applicazioni standard e possono funzionare meglio in casi particolari in cui è vantaggioso mescolare diversi ordini di base e penalità;
- *Cr*: Spline di regressione cubica;
- *Tp*: Thin plate regression splines.

Oltre alla regressione GAM con i suoi diversi smoothers abbiamo utilizzato la Loess regression. La regressione di Loess è una tecnica non parametrica che utilizza la regressione ponderata locale per adattare una curva attraverso i punti in un grafico a dispersione. Le curve di Loess possono rivelare tendenze e cicli in dati che potrebbero essere difficili da modellare con una curva parametrica (Wicklin, 2016).

Una fase preliminare al fitting è stata l'identificazione e rimozione di eventuali valori anomali che altrimenti provocherebbero delle distorsioni sulle regressioni. Ad esempio, nella Figura 1-25 in nero sono evidenziati valori NDVI anomali (outliers) che sono stati rimossi e non considerati nello studio della serie temporale.

Una volta scelta la tipologia di regressione per fittare le serie temporali è stata creata una banca dati delle serie fittate (dette anche lisce).

1.5 **Functional Data Analysis (FDA) delle serie temporali NDVI Sentinel-2 fittate**

La banca dati delle serie temporali NDVI Sentinel-2 fittate ottenuta nella sezione 1.4 è stata sottoposta alle analisi funzionali (*Functional Data Analysis - FDA*). Le FDA sono tecniche piuttosto recenti, ancora poco utilizzate nel Remote Sensing ed Ecologia. Tra le tecniche FDA la Functional Principal Component Analysis (FPCA) è quella da noi utilizzata per studiare le serie temporali (Pesaresi, et al., 2020).

Il PCA è un metodo attraverso la quale possiamo andare a ridurre, all'interno di un grande data-set, il numero di caratteristiche di quest'ultimo senza andare a perdere significato. I primi vantaggi dell'utilizzo del PCA sono sicuramente la diminuzione della potenza di calcolo

necessaria e la riduzione del tempo necessario per la creazione di un modello. Iniziando subito con un esempio di applicazione del PCA possiamo immaginare questo scenario: all'interno di un grafico 3D si trova una funzione che si estende in 3 dimensioni: x, y e z. La maggior parte delle variazioni della funzione si trovano lungo gli assi y e z, di conseguenza la variazione sull'asse x è minima. Per rappresentare i punti all'interno del grafico possiamo allora escludere la variazione lungo l'asse x, essendo essa di minima importanza per rappresentare i punti, trasformando quindi il nostro grafico in due dimensioni. Questo ci permette di gestire una dimensione in meno senza perdere molte informazioni importanti (Bescond, 2020)

L'FPCA (Functional PCA) può essere considerato come l'evoluzione della PCA, esso infatti va a diminuire le dimensioni di un dataset costituito da funzioni. La FPCA, infatti, considera una serie di valori discreti come una funzione e quindi un unico oggetto statistico. La FPCA individua le principali modalità di variazione tra le funzioni. Gli scores che si ottengono permettono di quantificare la somiglianza/dissomiglianza tra le funzioni (in questo caso le traiettorie temporali).

1.6 Software utilizzati

1.6.1 QGIS



Figura 1-26: Logo Qgis

QGIS, nello specifico QGIS Desktop 3.10.12, è una applicazione che permette di visualizzare, organizzare, analizzare e rappresentare dati spaziali. Il software è multiplatforma e può essere utilizzato in sistemi operativi come Windows e Linux. I dati possono essere organizzati in layers che possono essere sovrapposti allo scopo di rendere più comprensibile il quadro generale di studio.

Principalmente QGIS è stato utilizzato per la classificazione ambientale e vegetazionale delle aree test grazie con i dati sul bioclima (metti citazione) e sulla vegetazione (citazione carta vegetazione Saipem S.p.a.).

1.6.2 R



Figura 1-27: Logo R

R è un software open-source (multiplatforma che funziona in sistemi operativi Linux-based, Windows e MacOS) che permette la computazione statistica. R raccoglie una grande varietà di strumenti per computazione statistica e grafica come la modellazione, lineare e non, analisi delle time-series e la classificazione (R Core Team, 2021)

Nella seguente tesi si è fatto affidamento nello specifico alle librerie:

- **Lubridate** (Grolemund & Wickham, 2011)
- **Forecast** (Hyndman & Khandakar, 2008)
- **Mgcv** (Wood, 2011)
- **Fdapace** (Gajardo, et al., 2021)
- **Vegan** (Oksanen, et al., 2020)

1.6.3 Google Earth Pro



Figura 1-28: Logo Google Earth

Google Earth (Google, sf) è un software che genera immagini virtuali della Terra utilizzando immagini satellitari ottenute dal telerilevamento terrestre, fotografie aeree e dati topografici memorizzati in una piattaforma GIS. Google Earth mostra una rappresentazione tridimensionale del terreno all'utilizzo dei dati DEM (Digital Elevation Model) collezionati durante la missione NASA Shuttle Radar Topography Mission. Il linguaggio KML è utilizzato all'interno del programma per gestire dati geospaziali in tre dimensioni (Google, sf).

Capitolo 2

RISULTATI E DISCUSSIONI:

2.1 Serie temporali NDVI Sentinel-2 delle aree test e controllo

Tra i metodi di regressione utilizzati, la LOESS (con span 0,1) è quella che ha permesso di ottenere (tramite valutazione visiva dei grafici) i migliori fittaggi delle serie temporali NDVI. Un esempio è riportato in Figura 2-2. L'interpolazione ottenuta con la LOESS è poco influenzata dai valori anomali (in particolare quelli che non siamo riusciti a rimuovere nella fase preliminare) e crea troppi artefatti. La curva fittata (lisciata), pertanto, mostra un comportamento sinuoso che descrive in maniera ottimale l'andamento dei valori NDVI inter- e intra-annuali nelle aree test. In Figura 2-2 sono mostrate tutte le interpolazioni delle serie temporali di un'area di un'area test Figura 2-1. Tutti i dettagli delle aree test (caratterizzazione bioclimatica, vegetazionale, e le serie temporali NDVI fittate sono mostrate nella sezione 3.1 in appendice). In queste figure è possibile notare una certa eterogeneità nelle dimensioni delle aree test e delle relative aree di controllo. Queste, infatti, non mostrano la stessa estensione perché: per quanto riguarda l'area test, essa è determinata appunto dalla pista ottenuta dal passaggio del metanodotto; mentre per quanto riguarda le aree di confronto, si è deciso di campionare un'area più grande ma che avesse le stesse caratteristiche sia ambientali e vegetazionali.

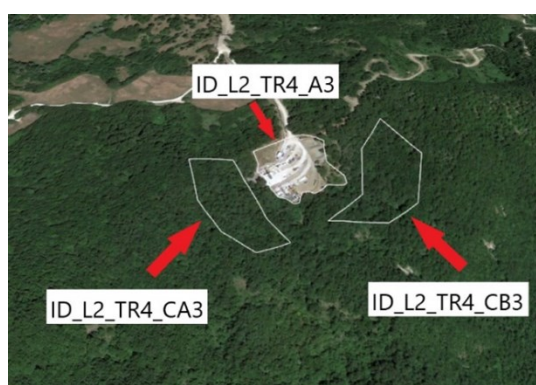


Figura 2-1: area test ID_L2_TR4_A3. Immagine del 07-07-2021

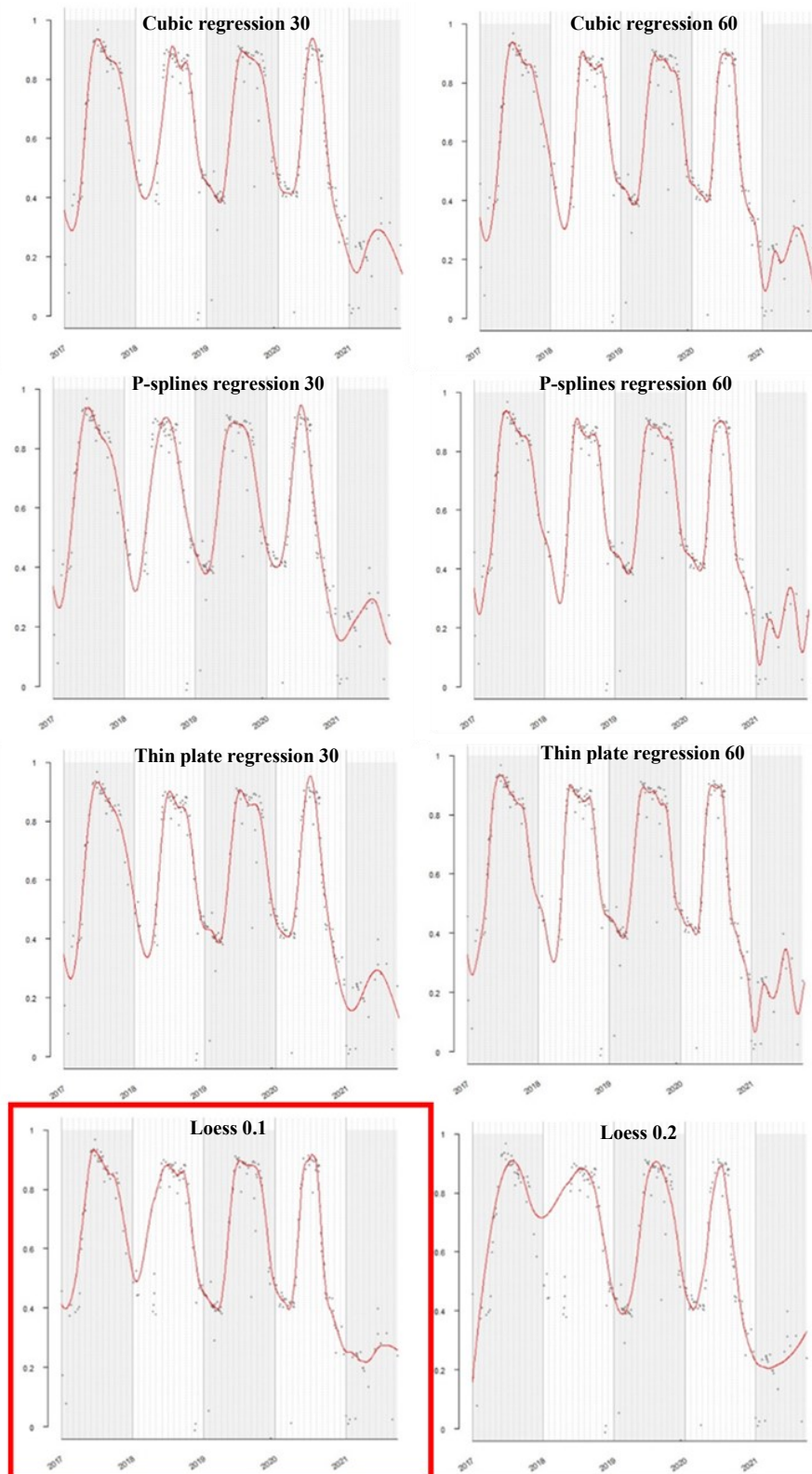


Figura 2-2: Serie temporali NDVI fittate con i vari smoothers. In rosso evidenziata la Loess 0.1

2.2 FPCA delle traiettorie temporali Sentinel-2

In Figura 2-3 sono rappresentate tutte le curve (traiettorie temporali) prodotte per le nostre aree. La FPCA ha identificato le principali modalità di variazione (pattern temporali) tra le curve (FPCA componenti).

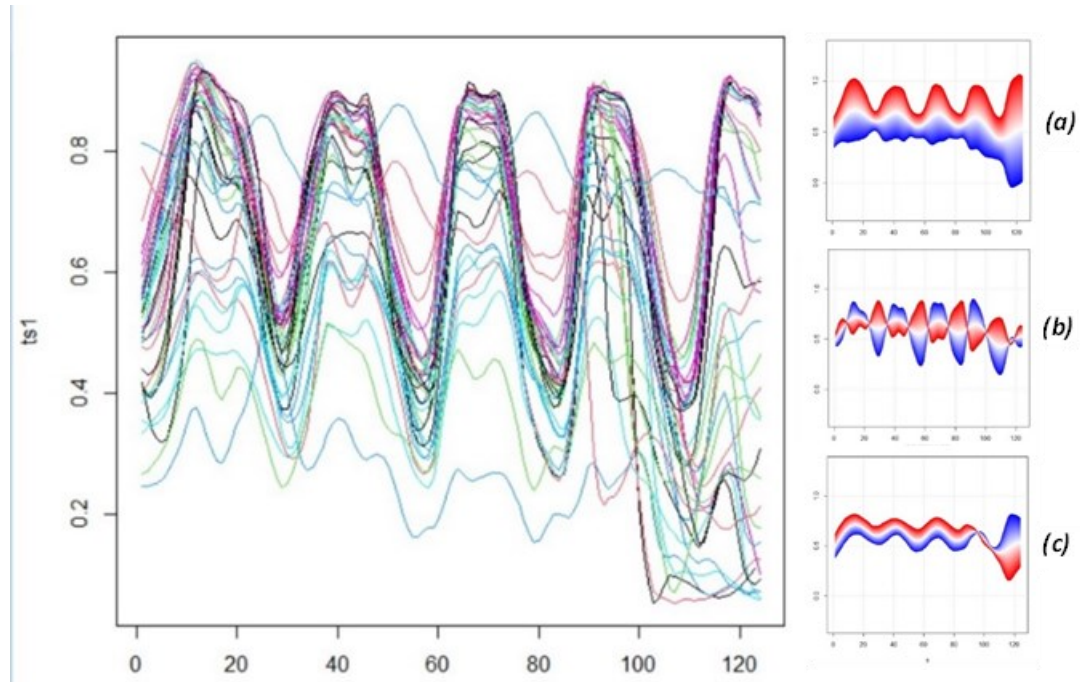


Figura 2-3: *A sinistra il grafico contenente tutte le curve delle aree campionate; (a) Prima componente della FPCA; (b) Seconda componente della FPCA; (c) Terza componente della FPCA.*

Le prime 3 componenti funzionali, che spiegano il 92,5% della variazione totale, rappresentano le principali variazioni fenologiche delle tipologie vegetazionali nelle aree indagate (Figura 2-3). La prima componente (FPCA1; Figura 2-3 a) ordina (in accordo agli scores delle componenti – FPCA scores) le curve con i valori NDVI più alti per tutto il periodo considerato alle curve con valori NDVI costantemente più bassi e che in particolare nell'ultimo anno subiscono un forte decremento indotto dal passaggio del metanodotto. La seconda componente della (FPCA2; Figura 2-3 b), invece, ordina le curve che hanno valori NDVI elevati in estate, dalle curve con un comportamento opposto, ossia valori NDVI più elevati in inverno. La terza componente (FPCA3; Figura 2-3 c), invece, si occupa esclusivamente della variazione dell'ultimo anno e ordina le curve che presentano livelli di NDVI nell'ultimo anno decisamente più bassi rispetto gli anni passati, dalle curve che invece si presentano stabili nel corso del tempo.

I punteggi relativi alle componenti (FPCA scores) permettono di plottare in uno spazio cartesiano ridotto (definito dalle componenti FPCA1, FPCA2, FPCA3) le curve (traiettorie temporali). Le distanze nel plot sono una quantificazione della somiglianza/dissomiglianza fenologica tra le tipologie vegetazionale delle aree.

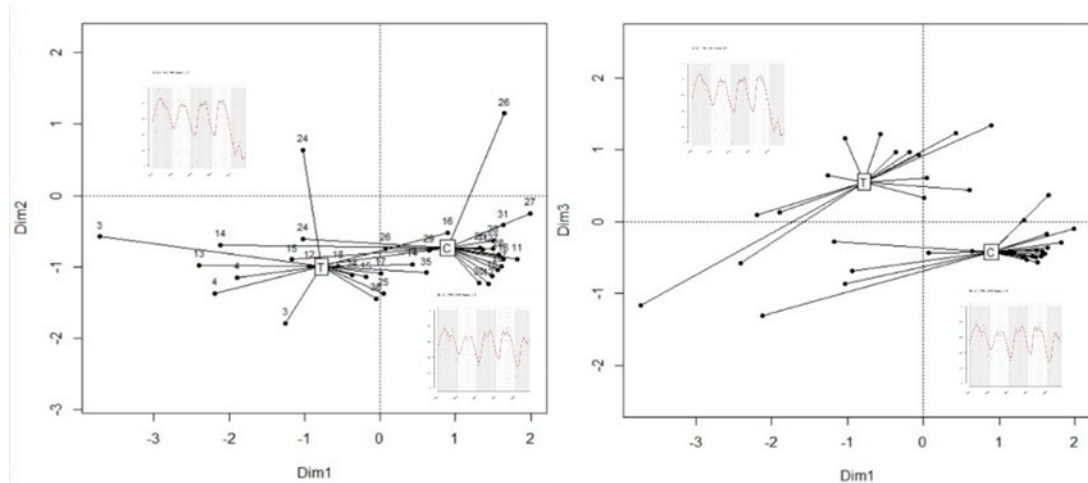


Figura 2-4: Spazio ridotto di ordinamento fenologico FPCA. Gli Spiderplot mostrano la differenza che intercorre tra le aree test e le aree confronto. T – area test, C – area controllo.

Il grafico separa chiaramente le aree test dalle aree. Il grafico, pertanto, evidenzia una netta distinzione tra le curve che descrivono dalle aree interessate dal passaggio del metanodotto e quelle invece integre (aree controllo) che non hanno subito il passaggio del metanodotto. Le curve differiscono principalmente nell'ultimo anno. È evidente la differenza tra le aree test caratterizzate da forte decremento dei valori NDVI nell'anno 2021 e le aree controllo che invece mantengono i livelli di NDVI a regime con gli anni precedenti.

2.3 FPCA delle traiettorie temporali delle tipologie vegetazionali

La seguente FPCA è stata eseguita per determinare se tra le tipologie vegetazionali analizzate e le traiettorie temporali NDVI ci fosse una relazione univoca e cioè se fosse possibile affermare che ogni tipologia vegetazionale è caratterizzata esclusivamente da una propria traiettoria temporale NDVI. Se validata tale relazione, il pattern della traiettoria temporale, allora, rappresenterebbe un segno inequivocabile identificativo della tipologia vegetazionale (associazione vegetale).

Per eseguire questa FPCA abbiamo preso in considerazione solamente le aree di controllo non interessate dall'attraversamento del metanodotto, per una più facile interpretazione dei pattern temporali (componenti FPCA). In Figura 2-5 sono mostrate le traiettorie temporali delle aree controllo.

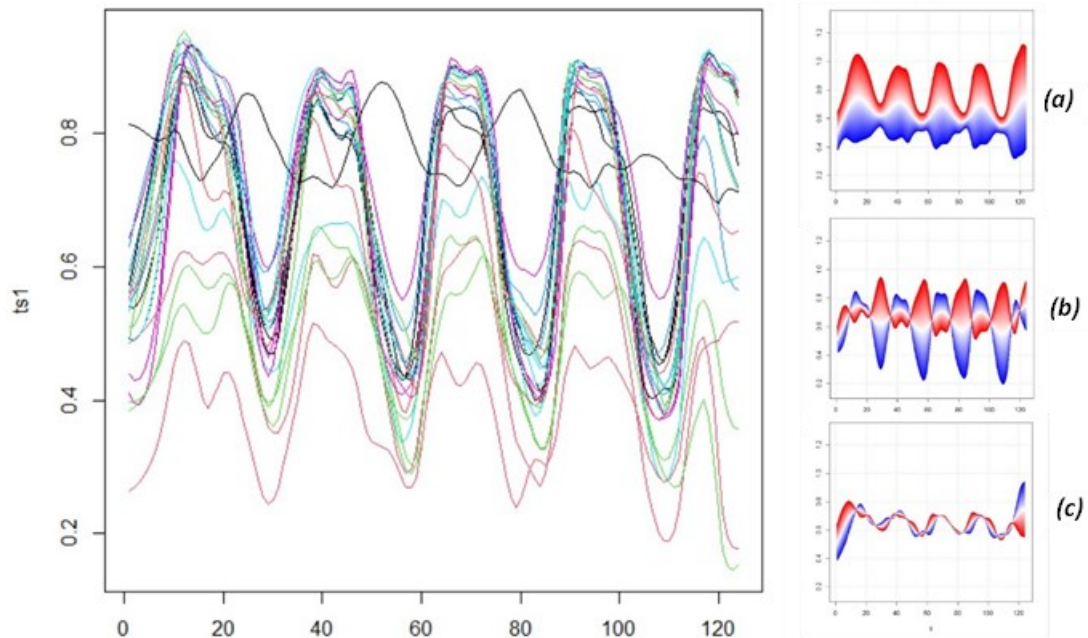
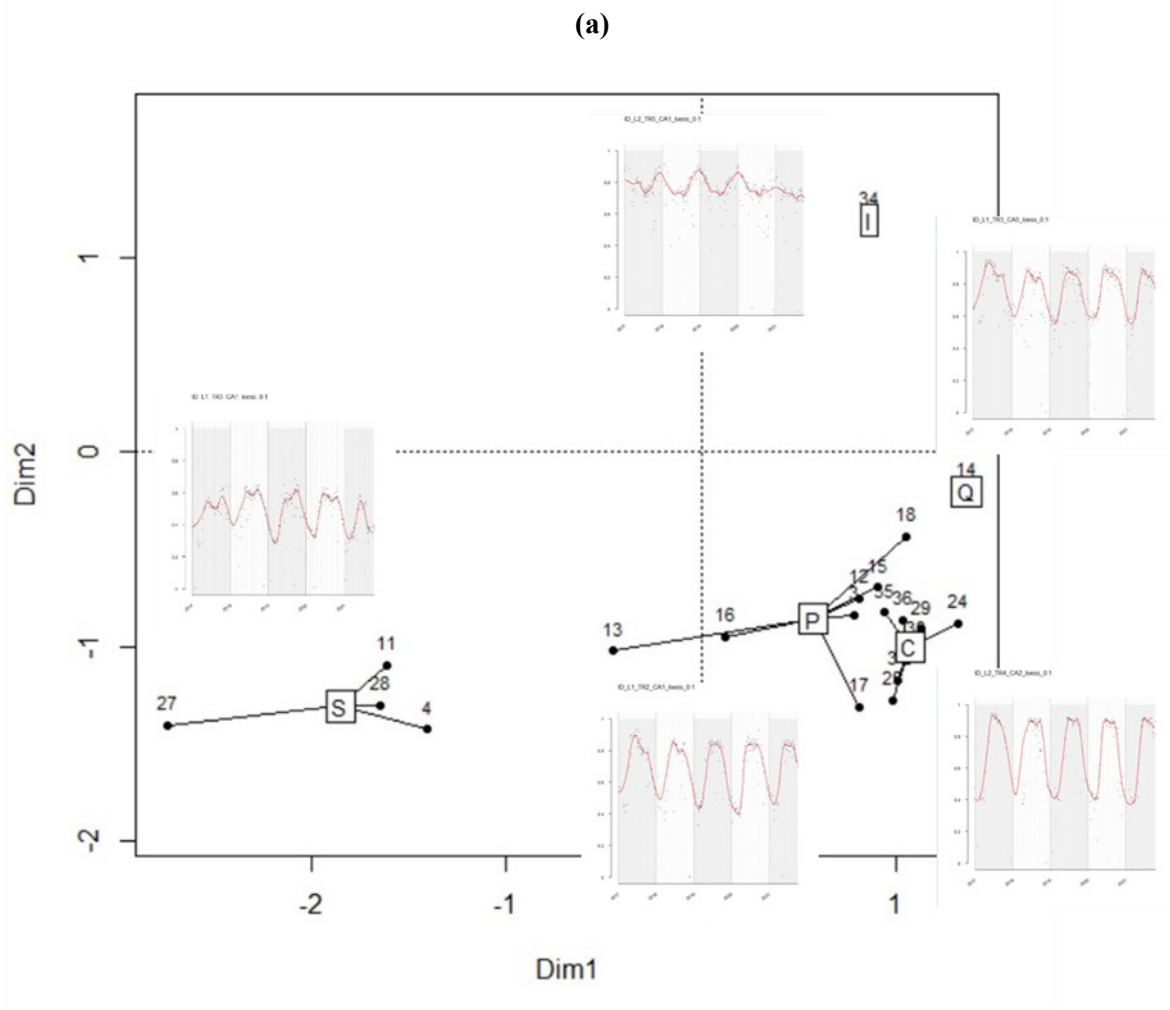


Figura 2-5: *A sinistra il grafico contenente tutte le curve delle aree controllo; (a) Prima componente della FPCA; (b) Seconda componente della FPCA; (c) Terza componente della FPCA.*

Come nel precedente caso dettagliamo i primi tre pattern principali (componenti funzionali) indentificati dalla FPCA. La Figura 2-5 a mostra la prima componente che ordina le traiettorie che presentano valori NDVI costantemente più alti (in rosso) rispetto alle traiettorie con valori NDVI mediamente più bassi. La prima componente mostra la tipica stagionalità delle tipologie caducifoglie con incrementi NDVI nel periodo primaverile-estivo. La seconda componente

(Figura 2-5 b), invece, mostra una stagionalità differente. Ordina le curve che i valori massimi NDVI nei mesi invernali (es. i rimboschimenti di conifere) da quelle che nello stesso periodo invece hanno valori molto bassi (in blue). Figura 2-5 c, invece, mostra la terza componente FPCA che presenta le sue massime variazioni nel primo e ultimo anno.

Gli scores delle componenti sopra descritte hanno permesso di definire lo spazio ridotto di ordinamento fenologico. La sovrapposizione delle distinte tipologie vegetazionali (spiderplot) mette in evidenza che queste hanno comportamenti fenologici distinti. Le associazioni vegetali, infatti, occupano settori distinti dell'ordinamento. Le distanze tra le tipologie sono approssimazione delle somiglianze/dissomiglianze in termini fenologici tra le differenti tipologie vegetazionali indagate figura 2-6 a.



(b)

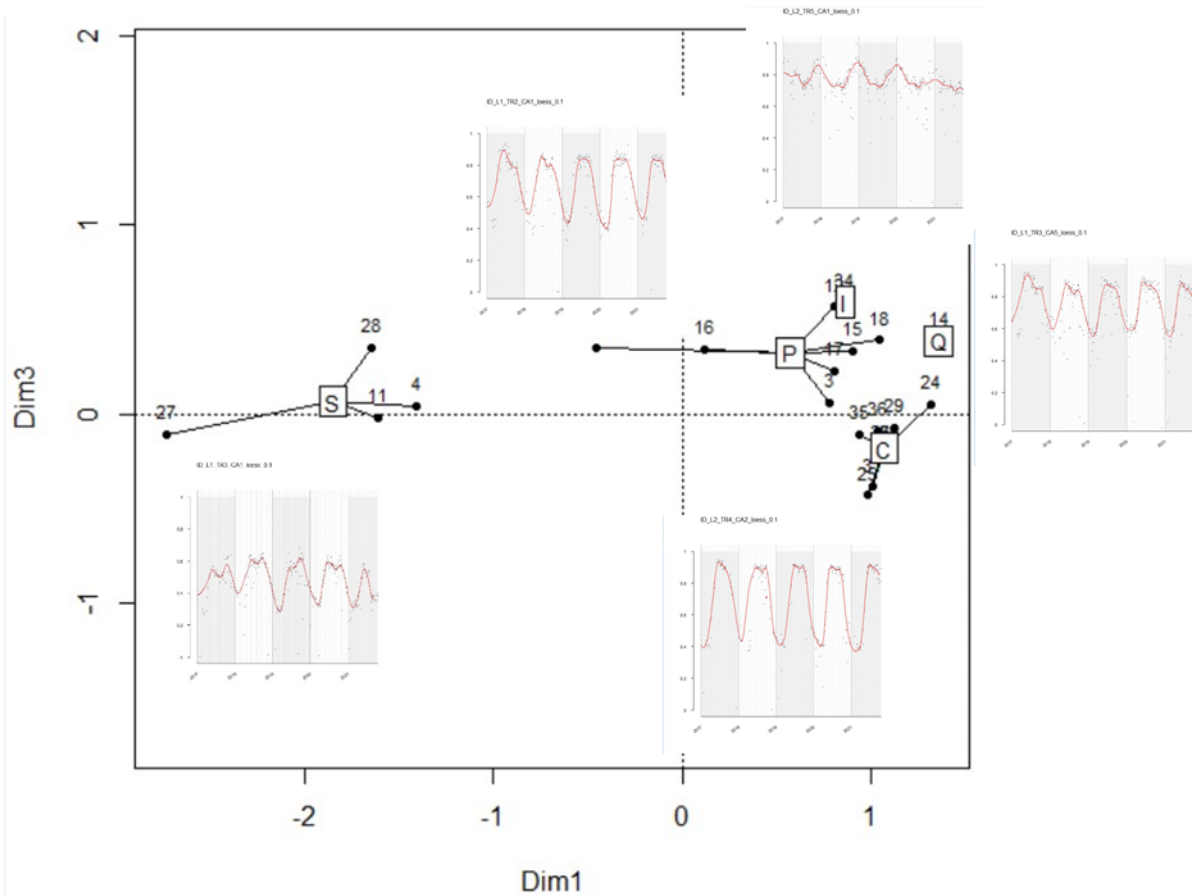


Figura 2-6: Spazio ridotto di ordianmento fenologico FPCA. Gli Spiderplot rappresentano le distinte tipologie vegetazionali (le etichette fanno riferimento alla tabella 1-3). Le tipologie vegetazionali hanno differenti variazioni spettrali.

Il grafico (Figura 2-6 b) mostra che i saliceti arbustivi di greto si presentano con valori NDVI contenuti rispetto alle altre tipologie. L'andamento è quello classico di un arbusteto caduco, con valori maggiori in estate e minimi in inverno.

Proseguendo verso destra lungo la componente FPCA1 abbiamo i pioppeti golenali. Questi hanno traiettorie NDVI con valori elevati nel periodo estivo e minimi nei periodi invernali.

Successivamente abbiamo le cerrete subacidofile mesofile. A prima vista hanno una curva simile a quella dei pioppeti golenali. La principale differenza però è rappresentata dal picco estivo: nelle cerrete, infatti, si arriva a valori prossimi a 1; sempre dal grafico è possibile determinare un'altra peculiarità dei cerri e cioè la caducità delle foglie molto tardiva; infatti, le curve presentano una campana molto ampia, sintomo di foglie mantenute sui rami molto più a lungo delle altre piante.

I querceti di roverella (rappresentati da un'unica area) si differenziano dalle cerrete e dai pioppeti in quanto i valori NDVI si mantengono piuttosto elevati nei periodi invernali mai inferiori a 0.6.

Gli impianti a conifere sono perlopiù caratterizzati dal pattern della seconda componente FPCA. Questi mostrano una curva NDVI distante dalle altre categorie in quanto ha i picchi massimi mesi invernali ed i minimi in estate ma mai inferiori a 0.7.

I grafici FPCA mostrano una buona relazione tra le tipologie vegetazionali e le variazioni fenologiche derivate dalle traiettorie temporali. Infatti, ogni tipologia occupa un settore distinto dello spazio di ordinamento (Figura 2-6). Se da un lato è stato dimostrato che le associazioni vegetali hanno profili stagionali spettrali medi univoci (Pesaresi, et al., 2020) questa tesi mostra che tale relazione si conferma anche con le traiettorie temporali multi-annuali.

Questo risultato è probabilmente generalizzabile anche in altri contesti differenti da quello del metanodotto. Ad esempio, ricostruire una traiettoria temporale di un'area interessata da un incendio severo, dove non abbiamo più alcuna traccia sulla vegetazione originaria, dall'osservazione delle traiettorie temporali NDVI, possiamo capire e risalire alla vegetazione presente prima del disturbo con importanti ricadute nell'ottica del ripristino.

Il concetto che vuole essere affermato in questa trattazione è principalmente che se tramite analisi delle traiettorie temporali dell'indice NDVI sappiamo che in una determinata area è presente un determinato tipo di vegetazione e per un qualsiasi motivo nella serie storica dell'indice NDVI è rilevabile una difformità tra gli anni, probabilmente quello che dovremmo aspettarci è che sia avvenuto un disturbo esterno che ne ha causato la variazione, ma non solo, infatti ci permette di sapere anche quali sono i livelli massimi e minimi che si raggiungono all'interno dell'anno e degli anni, per cui se sono presenti fenomeni a lenta evoluzione che vanno a modificare l'assetto morfologico di una determinata area, sapremo anche prevedere quelli che sono i risultati che si potrebbero verificare.

Se da un lato la metodologia ha evidenziato una forte relazione tra le traiettorie temporali e le tipologie vegetazionali, dall'altro va rimarcato che molte tipologie vegetazionali non sono state inserite nel campionamento (es. ostrieti, faggete etc). Inoltre, il campionamento è risultato piuttosto sbilanciato, e per alcune categorie non è stato possibile rappresentarle nel modo migliore (es. querceti di roverella e impianti di conifere).

2.4 FPCA per ogni categoria

L'ultima applicazione della FPCA ha previsto l'analisi dei singoli anni (curve annuali) all'interno di ciascuna categoria. Questo allo scopo di valutare le somiglianze/dissomiglianze tra gli anni e per rendere visibile e quantificabile le variazioni annuali nella traiettoria temporale di ciascuna categoria. Tale analisi, è stata pensata soprattutto per essere ripetuta negli anni al fine di monitorare il processo di rinaturalizzazione di ogni categoria e stabilire quando questo processo ha raggiunto un livello caratterizzato da variazioni spettrali stagionali molto simili o uguali a quelle *ante operam*.

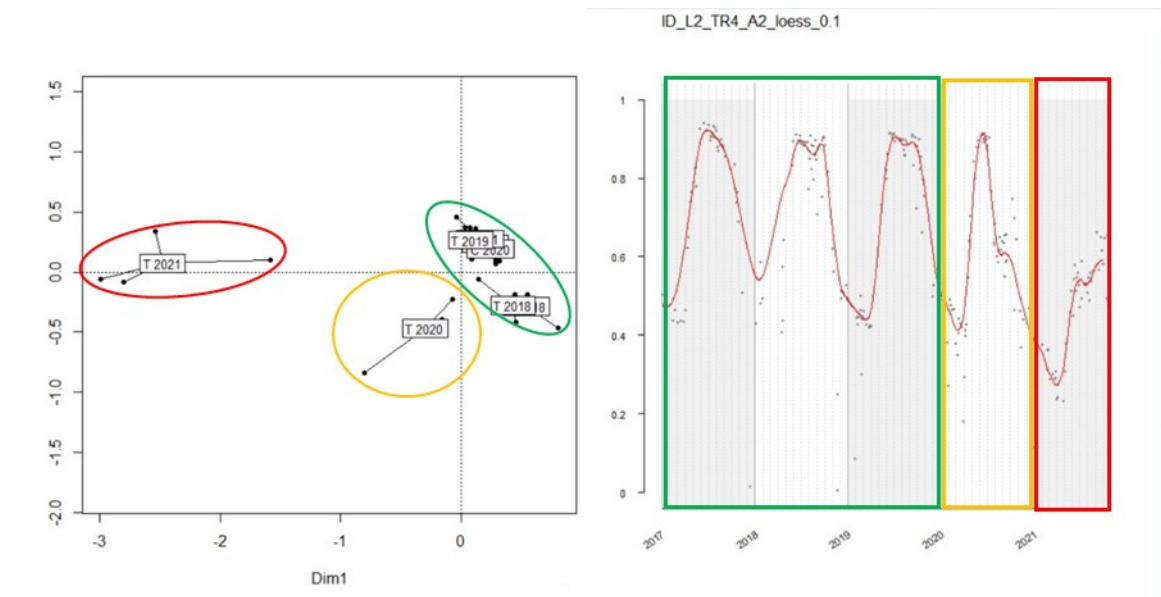


Figura 2-7: FPCA per anni delle cerrete subacidofile mesofile

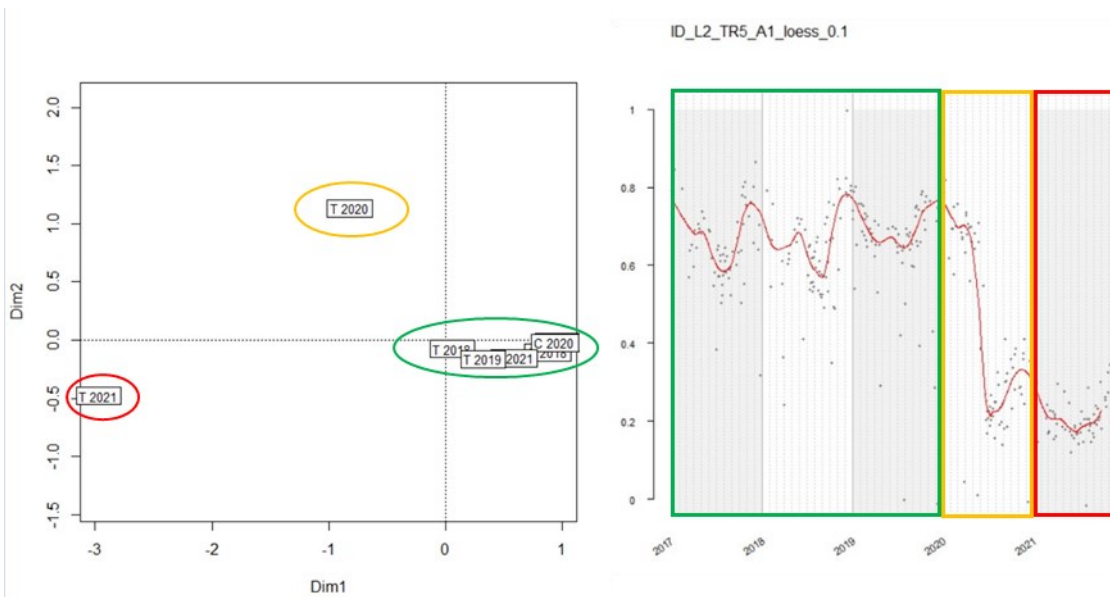


Figura 2-8: FPCA per anni dell'impianto di conifere

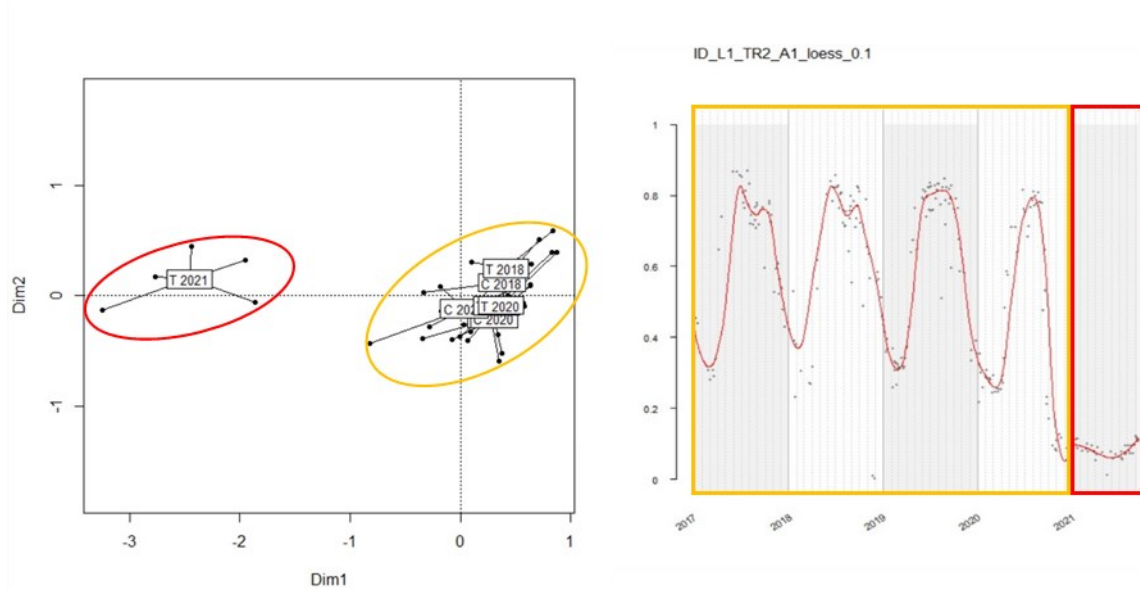


Figura 2-9: FPCA per anni dei pioppeti golenali

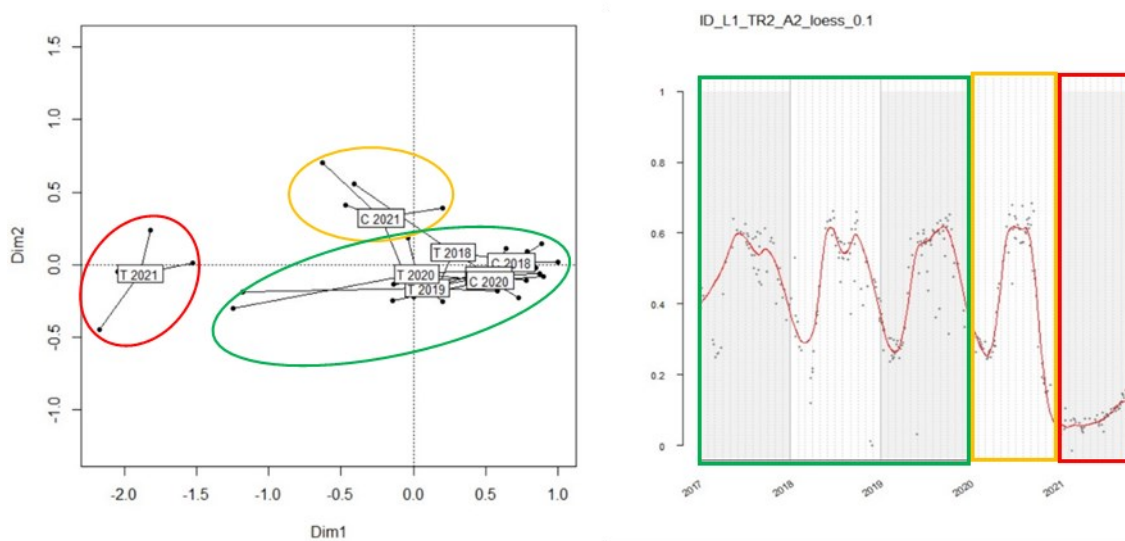


Figura 2-10: FPCA per anni dei saliceti arbustivi di greto

Nelle figure 2-7,8,9,10 sono mostrati i risultati delle FPCA che ordinano gli anni (2017, 2018, 2019, 2020 e 2021) in accordo alle principali variazioni identificate. In particolare, si può osservare la forte somiglianza tra i primi 3 anni (2017, 2018, 2019) (in verde nei grafici). L'anno 2020 mostra delle divergenze (complice l'inizio delle lavorazioni su alcune superfici forestali), pertanto nei grafici FPCA, tale anno si trova ad una discreta distanza dai precedenti.

L'anno 2021, invece, completamente differente dagli altri (in quanto è avvenuta l'asportazione del materiale vegetale) e per questo il più distante nei grafici FPCA.

Quest'ultima analisi eseguita su più anni ci permette di capire sia quando il disturbo si è verificato, ma in ottica di ripristino anche quando gli anni a seguito del disturbo sono ritornati ad una condizione di naturalità; questo semplicemente osservando le curve spettrali e cioè quando saranno sovrapponibili di nuovo con quelle *ante operam* (in questo caso le curve nel grafico FPCA dovrebbero riavvicinarsi o sovrapporsi a quelle degli anni evidenziati in verde). Dal punto di vista ambientale, tali analisi ci danno informazioni anche sui tempi di ripristino e rinaturalizzazione delle comunità vegetali evidenziando quelle che reagiscono meglio ad un disturbo e allo stesso tempo valutare se effettivamente la vegetazione presente sta rispondendo come avevamo previsto o se invece sta subendo una deriva (in termini di traiettoria) rispetto alle condizioni *ante-operam*.

Capitolo 3

CONCLUSIONI

Le analisi funzionali, in particolare la FPCA, applicate alle serie temporali NDVI tele-rilevate Sentinel-2 costituiscono una efficiente e promettente metodologia per la caratterizzazione *ante operam* e per il monitoraggio *post operam* del processo di rinaturalizzazione della vegetazione nelle aree interessate dal passaggio del metanodotto.

In particolare, la metodologia permette di caratterizzare una determinata tipologia vegetazionale (associazione vegetale) in maniera esclusiva con una propria e tipica stagionalità (traiettoria) NDVI. Tale relazione rende la metodologia proposta affidabile nel contesto dei monitoraggi e dei ripristini vegetazionali. Le traiettorie temporali tele-rilevate sono di fatto archivi ‘storici’ le cui variazioni (interpretabili ecologicamente e quantificabili, vedi FPCA scores) ci raccontano le vicissitudini di un particolare comunità vegetale: di eventuali stress o disturbi subiti e delle eventuali e successive dinamiche di recupero.

Qualsiasi tipo di variazione (es. netta e rapida, graduale e lenta etc), può essere identificata, quantificata ed interpretata con questa metodologia. Una variazione netta e rapida può essere determinata da un disturbo violento e repentino (es. il taglio di un bosco per ricavare la pista per il metanodotto), mentre una variazione lenta e graduale può essere, invece, determinata da fenomeni a lenta evoluzione che si espletano nel corso di più anni come i processi dinamici di rinaturalizzazione della vegetazione o quelli legati ai cambi climatici.

Ulteriore beneficio di questa analisi quantitativa (ordinamenti FPCA) delle serie temporali è la capacità di identificare il momento preciso in cui avviene il disturbo. La curva NDVI, infatti, mostra una forte modifica e non segue il ‘normale’ andamento degli anni precedenti. La stessa metodologia, però, consente di determinare il momento in cui un ripristino può dirsi completato e cioè quando i ritmi fenologici (traiettorie temporali) sono tornati uguali o molto simili a quelli *ante operam* cioè precedenti al disturbo.

Va evidenziato, però, che in questa tesi il numero delle tipologie vegetazionali indagate non è molto elevato; pertanto, ulteriori studi e tesi dovrebbero considerare un pool più ampio di comunità vegetali per una maggiore e robusta validazione statistica delle analisi FPCA.

Un'altra limitazione è rappresentata dal periodo temporale esaminato. Il periodo, infatti, non consente di valutare il comportamento spettrale *post operam* in maniera sufficiente. Tuttavia, tale limite è facilmente superabile con studi ripetuti nel tempo che potranno considerare un periodo *post operam* più lungo e fornire ordinamenti più completi, come nel caso della FPCA per anni.

Inoltre, è ipotizzabile utilizzare altri indici di vegetazione (es. NDWI) per catturare le variazioni stagionali della vegetazione, ma anche di altre componenti biotiche e abiotiche dell'ecosistema. Lo studio ci permette di affermare che le tipologie vegetazionali riconosciute in campo sono distinguibili dalla rilevazione eseguita tramite satellite e che normalmente esse si manifestano con un tipico e caratteristico ciclo annuale e poli annuale fin quando un disturbo esterno non compromette tale ciclicità.

Ovviamente tale metodologia non deve permetterci di peccare di superbia quando si parla di completezza di analisi; piuttosto tale metodologia può e deve integrarsi con le analisi di campo che rappresentano dei dati ecologici di riferimento irrinunciabili.

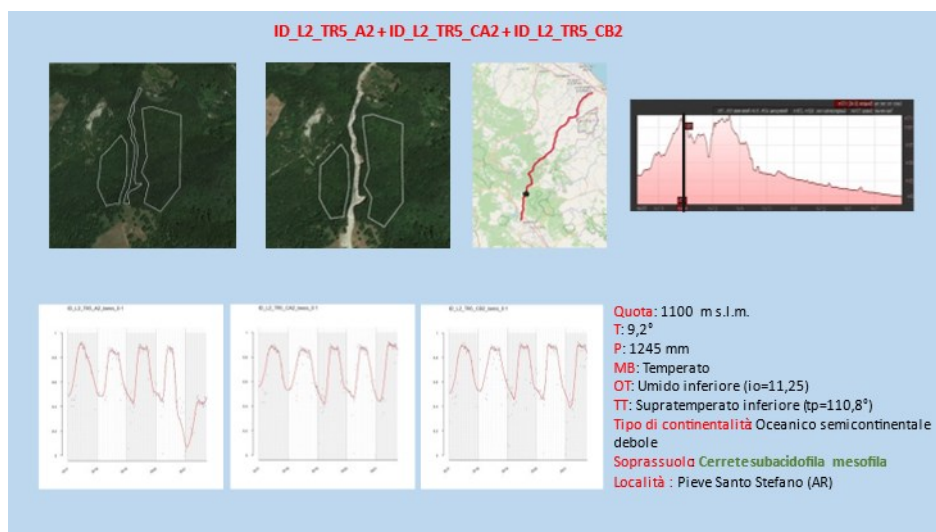
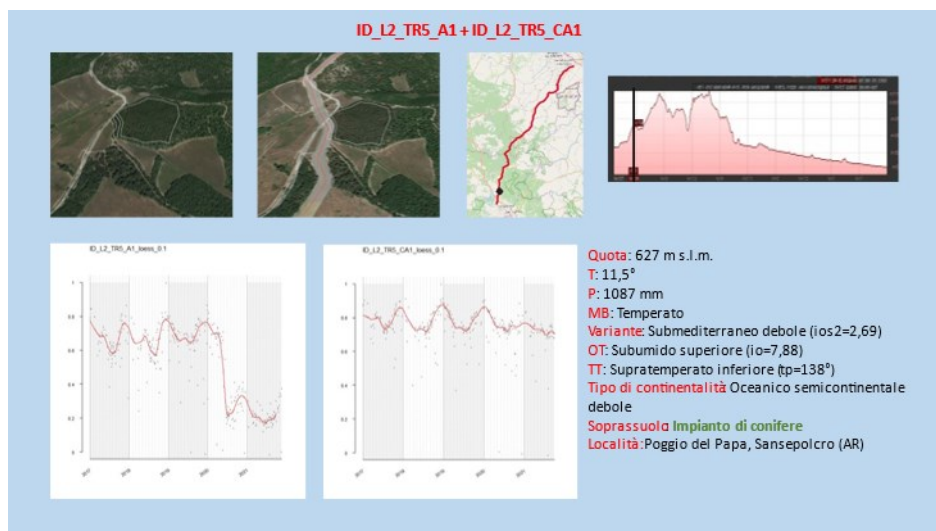
Comunque, il linguaggio matematico rimane l'unico assolutismo in natura e perciò se le analisi FPCA produrranno determinati risultati, essi saranno sicuramente indicatori e raramente contraddittori con quella che è la realtà delle cose.

CAPITOLO 4

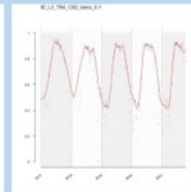
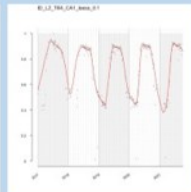
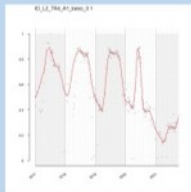
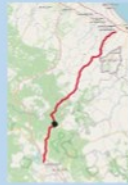
APPENDICE

3.1 Schede delle aree test

In questa sezione sono riportate i dettagli (localizzazione geografica sul tracciato del metanodotto, tipologia vegetazionale, inquadramento bioclimatico, serie temporali NDVI Sentinel-2 fittate) di tutte le aree test.

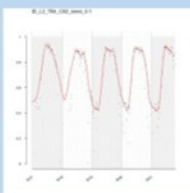
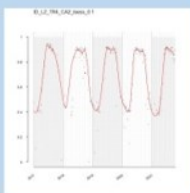
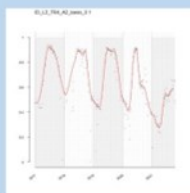
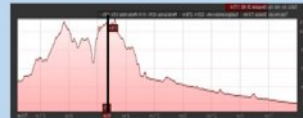


ID_L2_TR4_A1+ID_L2_TR4_CA1+ID_L2_TR4_CB1



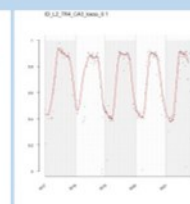
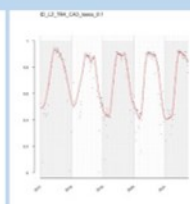
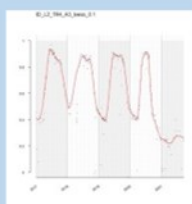
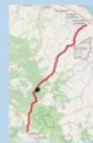
Quota: 860 m s.l.m.
 T: 10,6°
 P: 1217 mm
 MB: Temperato
 OT: Umido inferiore (io=9,5)
 TT: Supratemperato inferiore (tp=128°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale debole
 Soprassuola Cerrete subacidofila mesofila
 Località: Sasso di Cocchiola, Badia Tebalda (AR)

ID_L2_TR4_A2+ID_L2_TR4_CA2+ID_L2_TR4_CB2



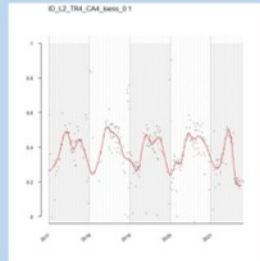
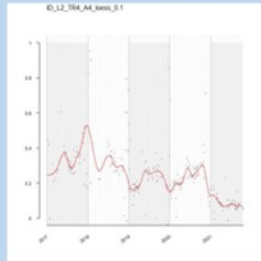
Quota: 1120 m s.l.m.
 T: 9,1°
 P: 1267 mm
 MB: Temperato
 OT: Umido inferiore (io=11,56)
 TT: Supratemperato superiore (tp=109,5°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale debole
 Soprassuola Cerrete subacidofila mesofila
 Località: Monte Montale; confine tra Emilia Romagna e Toscana

ID_L2_TR4_A3+ID_L2_TR4_CA3+ID_L2_TR4_CB3



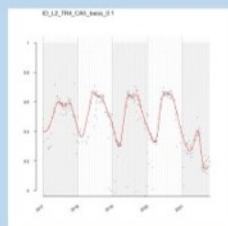
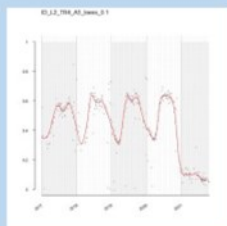
Quota: 985 m s.l.m.
 T: 9,6°
 P: 1226 mm
 MB: Temperato
 OT: Umido inferiore (io=10,63)
 TT: Supratemperato inferiore (tp=115,3°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale debole
 Soprassuola Cerrete subacidofila mesofila
 Località: Monte della Rena, Casteldelci (RN)

ID_L2_TR4_A4+ID_L2_TR4_CA4



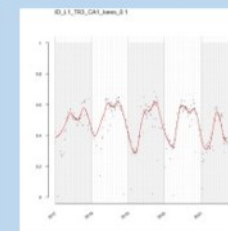
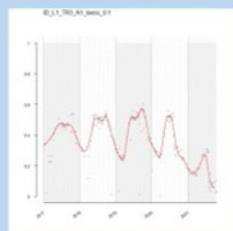
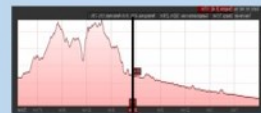
Quota: 400 m s.l.m.
 T: 11,9 °
 P: 1044 mm
 MB: Temperato
 OT: Submido superiore (io=7,26)
 TT: Supratemperato inferiore (tp=143,7°)
 Tipo di continentalità: Oceanico semicontinentale debole
 Soprassuolo: Saliceto arbustivo di greto
 Località: Molino di Sant'Antimo, Badia Tebalda (AR)

ID_L2_TR4_A5+ID_L2_TR4_CA5



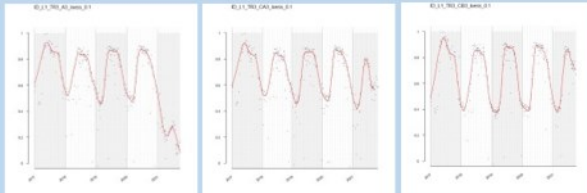
Quota: 398 m s.l.m.
 T: 12,1 °
 P: 1035 mm
 MB: Temperato
 OT: Submido superiore (io=7,12)
 TT: Supratemperato inferiore (tp=145,3°)
 Tipo di continentalità: Oceanico semicontinentale debole
 Soprassuolo: Saliceto arbustivo di greto
 Località: Molino di Sant'Antimo, Badia Tebalda (AR)

ID_L1_TR3_A1+ID_L1_TR3_CA1



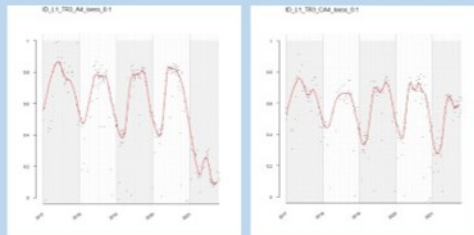
Quota: 360 m s.l.m.
 T: 12,3 °
 P: 1003 mm
 MB: Temperato
 OT: Submido superiore (io=6,7)
 TT: Supratemperato inferiore (tp=148,4°)
 Tipo di continentalità: Oceanico semicontinentale debole
 Soprassuolo: Saliceto arbustivo di greto
 Località: Valmarino, Pennabilli (RN)

ID_L1_TR3_A3+ID_L1_TR3_CA3+ID_L1_TR3_CB3



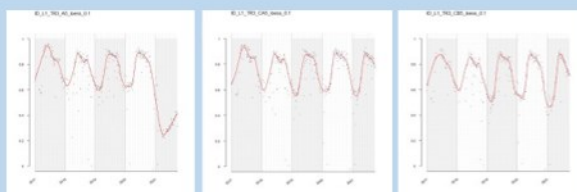
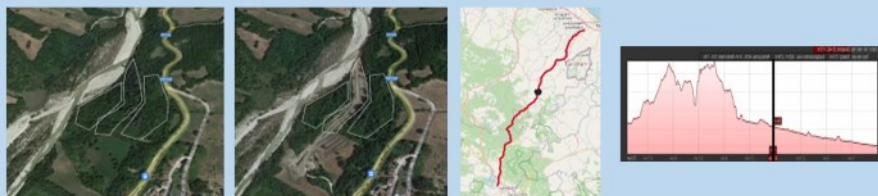
Quota: 330 m s.l.m.
 T: 12,5°
 P: 960 mm
 MB: Temperato
 OT: Subumido superiore (io=6,4)
 TT: Mesotemperato inferiore (tp=150°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale forte
 Soprassuola Pioppeto golenale
 Località: Ponte Messa, Pennabilli (RN)

ID_L1_TR3_A4+ID_L1_TR3_CA4



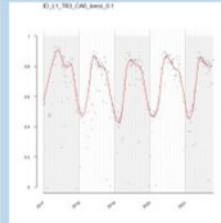
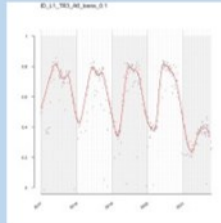
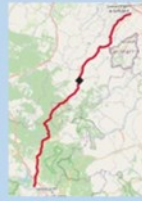
Quota: 328 m s.l.m.
 T: 12,5°
 P: 960 mm
 MB: Temperato
 OT: Subumido superiore (io=6,4)
 TT: Mesotemperato inferiore (tp=150°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale debole
 Soprassuola Pioppeti golenale
 Località: Ponte Messa, Pennabilli (RN)

ID_L1_TR3_A5+ID_L1_TR3_CA5+ID_L1_TR3_CB5



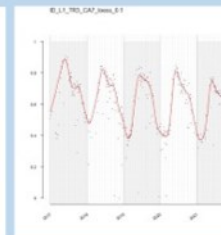
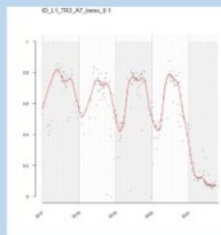
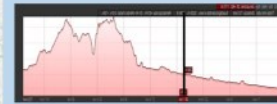
Quota: 294 m s.l.m.
 T: 12,6°
 P: 877 mm
 MB: Temperato
 OT: Subumido inferiore (io=5,7)
 TT: Supratemperato superiore (tp=151,8°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale forte
 Soprassuola Pioppeto golenale
 Località: Santa Maria (RN)

ID_L1_TR3_A6+ID_L1_TR3_CA6



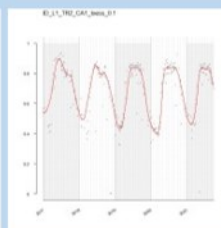
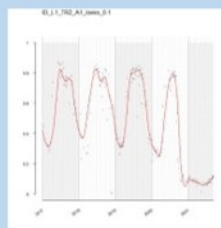
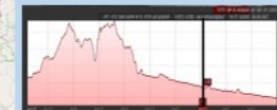
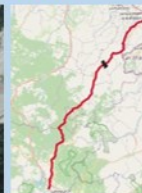
Quota: 294 m s.l.m.
 T: 12,6°
 P: 863 mm
 MB: Temperato
 OT: Subumido inferiore (io=5,7)
 TT: Mesotemperato superiore (tp=151,8°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale forte
 Soprassuola Pioppeto golenale
 Località: Ponte Molino Baffoni, Santa Maria (RN)

ID_L1_TR3_A7+ID_L1_TR3_CA7

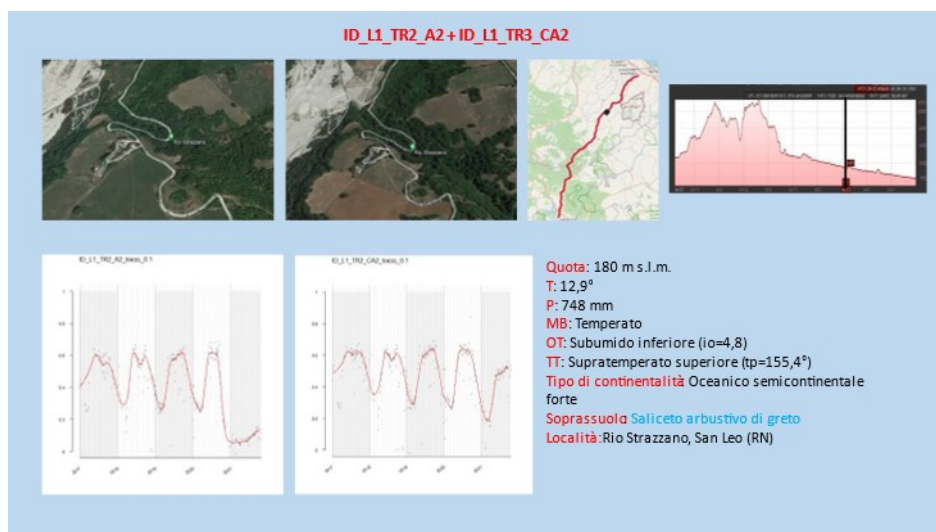


Quota: 260 m s.l.m.
 T: 12,7°
 P: 826 mm
 MB: Temperato
 OT: Subumido inferiore (io=5,4)
 TT: Mesotemperato superiore (tp=153°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale forte
 Soprassuola Pioppeto golenale
 Località: Le porte, Novafeltria (RN)

ID_L1_TR2_A1+ID_L1_TR2_CA1



Quota: 185 m s.l.m.
 T: 12,8°
 P: 745 mm
 MB: Temperato
 OT: Subumido inferiore (io=4,8)
 TT: Mesotemperato superiore (tp=154,3°)
 Tipo di continentalità Oceanico semicontinentale forte
 Soprassuola Pioppeto golenale
 Località: Novafeltria (RN)



3.2 Tabella manufatti

In questa sezione è riportata la tabella manufatti costruiti per consentire al metanodotto il passaggio in punti critici (Saipem S.p.A., 2017)

N. ord.	Progr. (km)	Località/corso d'acqua	Descrizione dell'intervento
1	14,055	Torrente San Marino	difesa spondale con scogliera in massi
2	17,195	Torrente Mazzocco	Demolizione e ripristino n. 2 ricostituzioni spondali con gabbioni
4	23,545	Fosso Talamello	rivestimenti spondali in massi
5	26,175	Fiume Marecchia	rivestimenti spondali in massi
6	28,59	Fiume Marecchia	difesa spondale con scogliera in massi
7	29,335	Fiume Marecchia	difesa spondale con scogliera in massi
8	29,595	Fiume Marecchia	difesa spondale con scogliera in massi
9 bis	30,345	Fiume Marecchia	difesa spondale con scogliera in massi
10 bis	30,705	Fiume Marecchia	difesa spondale con scogliera in massi
11	33,22	Rio senza nome	ricostituzione alveo con massi, ricostituzioni spondali con muri cellulari in legno e pietra

12	33,7	Fosso Bandito	Demolizione, ripristino e prolungamento del rivestimento in massi
13	35,48	Rio Cavo	rivestimento spondale in massi
14	35,835	Fiume Marecchia	difesa spondale con scogliera in massi
15	37,23	Torrente Messa	difesa spondale con scogliera in massi
16	38,92	Fiume Marecchia	difesa spondale con scogliera in massi
17	42,365	C.Montevecchio	paratia di pali trivellati
18	42,65	C.Montevecchio	paratia di pali trivellati
19	43,12	Ca' di Martino	muro di contenimento in c.a.
19 bis	43,225	Ca' di Martino	muro di contenimento in c.a.
20	43,345	Ca' di Martino	paratia di pali trivellati
21	43,465	Ca' di Martino	muro di contenimento in gabbioni
21 bis	43,945	Ca' Serra	paratia di pali trivellati
22	44,14	Ca' Serra	paratia di pali trivellati
22 bis	44,53	Monte Zucchetta	paratia di pali trivellati
23	45,375	Frassineto	paratia di pali trivellati
24 bis	45,515	Frassineto	paratia di pali trivellati
25	45,565	Frassineto	muro di contenimento in gabbioni
25 bis	46,82	Trebbio	paratia di pali trivellati
26	47,74	Poggio della Veduta	paratia di pali trivellati
28 bis	49,69	Poggio Val d'Abeto	paratia di pali trivellati
29	54,615	Montebotolino	travi di contenimento in c.a
32	55,225	Fiume Marecchia	difese spondali con scogliera in massi
33	58,905	Svolta del Podere	paratia di pali trivellati
34	59,07	Svolta del Podere	paratia di pali trivellati
34 bis	59,15	Svolta del Podere	paratia di pali trivellati

35	59,375	Fosso della Svolta	rivestimenti spondali in massi
35 bis	60,87	Fosso della giustizia	ricostituzione alveo con massi
36	66,61	Fosso Poggio Tondo	ricostituzione alveo con massi
39	72	Fosso Muncinella	rivestimenti spondali con massi
40	72,695	Torrente Tignana	difese spondali con scogliera in massi

*c.a.=cemento armato

BIBLIOGRAFIA

- ARPA , 2014. *Agenzia Regionale Protezione Ambientale Valle d'Aosta*. [Online]
Available at: <https://www.arpa.vda.it/it/effetti-sul-territorio-dei-cambiamenti-climatici/fenologia/ndvi>
[Consultato il giorno 21 01 2022].
- Bassetti , R., 2003. *AR Appennino Romagnolo*. [Online]
Available at: <https://www.appenninoromagnolo.it/valli/marecchia.asp>
[Consultato il giorno 26 01 2022].
- Bescond, P.-L., 2020. *Principal components analysis (pca), fundamentals, benefits insights for industry*. s.l.:Medium.
- Bianchi, G., Verdi, G. & Rossi, M., 2018. Titolo dell'articolo. *Journal Name*, 48(3), pp. 11-15.
- Biogeografia, 2011. *Biogeografia*. [Online]
Available at: biogeografia.net/bioclima03b.html
[Consultato il giorno 22 01 2022].
- Consiglio delle comunità europee, 1992. *Direttiva relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche*, s.l.: Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea.
- Consiglio delle comunità europee, 2009. *Direttiva relativa alla conservazione degli habitat naturali e seminaturali e*, s.l.: Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea.
- Del Sorbo, M. R., 2011. *Algoritmi per l'elaborazione di serie temporali*, Napoli: Università di Napoli Federico II.
- Di Fonzo, T. & Lisi, F., 2005. *Serie storiche economiche*. Roma: Carrocci.
- Gajardo, A. et al., 2021. *fdapace: Functional Data Analysis and Empirical Dynamics*. [Online]
Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=fdapace>
[Consultato il giorno 22 01 2022].

- Google, sf. *Google Earth*. [Online]
Available at: <https://earth.google.com/web/>
[Consultato il giorno 24 01 2022].
- Grolemund, G. & Wickham, H., 2011. Dates and Times Made Easy with lubridate. *Journal of Statistical Software*, 40(3), pp. 1-25.
- Hyndman, R. & Khandakar, Y., 2008. Automatic time series forecasting: the forecast package for R. *Journal of Statistical Software*, 26(3), pp. 1-22.
- Luini, Brunetti, Sciosci & Giorgi, 2018. *Rifacimento metanodotto Rimini - Sansepolcro DN 650/750 (26"/30")*, DP 75 bar, s.l.: Saipem S.p.a..
- Ministero della Transizione Ecologica, 2021. *Rete Natura 2000*. [Online]
Available at: <https://www.mite.gov.it/pagina/sic-zsc-e-zps-italia>
[Consultato il giorno 21 01 2022].
- Ministero dello sviluppo economico, 2017. *Rifacimento Metanodotto Rimini – Sansepolcro*.
[Online]
Available at: <https://www.mise.gov.it/index.php/it/energia/gas-naturale-e-petrolio/gas-naturale/trasporto/metanodotti/2038387-rifacimento-metanodotto-rimini-sansepolcro>
[Consultato il giorno 27 01 2022].
- Ojinaga, O. d., 2014. *IEnova investirà nei gasdotti Ojinaga-El Encino a Chihuahua*. [Online]
Available at: <https://eldictamendeojinaga.blogspot.com/2014/07/ienova-invertira-en-gasoductos-ojinaga.html>
[Consultato il giorno 27 01 2022].
- Oksanen, J. et al., 2020. *vegan: Community Ecology Package*. [Online]
Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>
[Consultato il giorno 22 01 2022].
- Pesaresi, S., Casavecchia, S. & Mancini, A., 2020. Recognition and Characterization of Forest Plant Communities through Remote-Sensing NDVI Time Series. *diversity*, 12(8), p. 313.
- Pesaresi, S., Casavecchia, S. & Quattrini, G., 2017. *Classificazione e mappatura delle serie temporali NDVI di alcune comunità forestali del Monte Conero*, s.l.: Università Politecnica delle Marche.

- 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*, 12(7), p. 1132.
- R Core Team, 2021. *R: A language and environment for statistical computing*, Vienna: R Foundation for Statistical Computing.
- Regione Emilia-Romagna, 2008. *Usa del suolo di dettaglio regione Emilia-Romagna*. [Online]
Available at: <https://servizimoka.regione.emilia-romagna.it/mokaApp/apps/UDSD/index.html>
[Consultato il giorno 29 10 2021].
- Regione Toscana, s.d. *Regione Toscana- Sita: Usa e copertura del suolo*. [Online]
Available at: <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/usocoperturasuolo.html>
[Consultato il giorno 29 10 2021].
- Rivas Martinez, S., Rivas Sáenz, S. & Penas Merino, A., 2011. Worldwide bioclimatic classification system. *Global Geobotany*, Volume 1, pp. 1-634.
- Rossi, M., Bianchi, G. & Verdi, G., 2018. Titolo dell'articolo. *Journal Name*, pp. 10-15.
- Saipem S.p.a., 2017. *SPC. LA-E-83010 Rifacimento Metanodotto Rimini - Sansepolcro DN 650/750 (26"/30''), DP 75 bar ed opere connesse*, Studio di Impatto Ambientale, s.l.: SNAM Rete Gas.
- Simonetti, E., Simonetti, D. & Preatoni, D., 2014. *Phenology-based land cover classification using Landsat 8 time series*, Luxembourg: European commission Joint Research Centre.
- Sinergise Laboratory forgeographical information system, ltd, s.d. *EO Browser*. [Online]
Available at: <https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>
[Consultato il giorno 24 01 2022].
- Snam, 2021. *Snam-Sostenibilità*. [Online]
Available at: https://www.snam.it/it/sostenibilita/agire_per_ambiente/biodiversita.html
[Consultato il giorno 27 01 2022].
- Valentini, S., Bozzini, R., Giovannini, G. & Forlivesi, V., 2020. *RIFACIMENTO METANODOTTO SANSEPOLCRO – TERRANUOVA BRACCIOLINI DN 750 (30'') – DP 75 bar ED OPERE CONNESSE*, s.l.: Snam S.p.a..

- Verdi, G., 2017. Titolo del capitolo. In: R. Cristiano, a cura di *Titolo del libro*. Ancona: CasaEditrice, pp. 10-20.
- Weier, J. & Herring, D., 2000. Measuring vegetation (NDVI & EVI). *Earth Observatory*, 30 08, p. 1.
- Wicklin, R., 2016. *What is loess regression?*. [Online] Available at: <https://blogs.sas.com/content/iml/2016/10/17/what-is-loess-regression.html> [Consultato il giorno 24 10 2022].
- Wikipedia, 2022. *Google Earth*. [Online] Available at: https://it.wikipedia.org/wiki/Google_Earth [Consultato il giorno 24 01 2022].
- Wood, S., 2011. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society (B)*, 73(1), pp. 3-36.