



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

ANALISI DELLE VARIAZIONI NDVI NEI TRACCIATI DEI METANODOTTI

ANALYSIS OF NDVI VARIATIONS IN METHANE PIPELINE ROUTES

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
FILIPPO SERAFINI

Relatore:
DOTT. SIMONE PESARESI

Correlatori:
PROF.SSA SIMONA CASAVECCHIA

Dott. GIACOMO QUATTRINI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

*Vorrei ringraziare il mio relatore Dott. Pesaresi Simone
per il supporto e la guida preziosa che mi ha fornito
durante la stesura della mia tesi.*

SOMMARIO

SOMMARIO	3
ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI	9
1.1 Metanodotto Rimini-Sansepolcro	12
1.2 Caratterizzazione vegetazionale presente nel tracciato.....	12
1.3 Cenni sul telerilevamento.....	13
1.4 Aree test	16
1.5 Serie temporali	25
1.5.1 Immagini satellitari	26
1.5.2 Indice NDVI	27
1.6 Programmi utilizzati.....	27
1.6.1 QGIS	27
1.6.2 Microsoft Excel.....	28
1.6.3 Google Earth Pro	28
1.6.4 Google Earth Engine.....	28
CAPITOLO 2 RISULTATI E DISCUSSIONI.....	29
2.1 Serie temporali NDVI aree test e controllo.....	29
2.2 Cerrete subacidofile mesofile.....	29
2.3 Ginepreti	32
2.4 Pioppeti golenali	34
2.5 Querceti a roverella neutrobasifili.....	38
2.6 Faggeta eutrofica.....	40
2.7 Ostrieti.....	42
2.8 Saliceti arbustivi di greto	44
2.9 Media delle aree test e controllo dell'intero tracciato.....	48
CONCLUSIONI	50

BIBLIOGRAFIA 52

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 elenco categorie vegetative, con le Aree Test (A.T.), Controllo (A.C.) e le rispettive Superfici (S.A.T. - S.A.C.). Nelle ultime due colonne sono riportate le superfici totali ($S. TOT = S.A.T + S.A.C$) e la relativa percentuale della copertura vegetazionale... 18

Tabella 2: riepilogo categorie vegetative (disposte secondo il recupero di NDVI maggiore rispetto al valore originale delle relative aree test) 29

ELENCO DELLE FIGURE

<i>Figura 1 rete nazionale dei gasdotti (Snam S.p.A, 2024)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2 Il percorso del metanodotto Rimini-Sansepolcro. (a) inquadramento nelle regioni Emilia-Romagna e Toscana (b) dettaglio del percorso del metanodotto Rimini-Sansepolcro</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3 Superfici espresse in ettari delle varie tipologie vegetative e degli habitat ottenuti dall'analisi vegetazionale condotta dalla Saipem nello studio di impatto ambientale delle aree impattate dal metanodotto in fase di ante operam.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 4 Spettro elettromagnetico.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5 Ripartizione energia incidente (Ei) su una superficie in: energia trasmessa (Et), riflessa (Er) e assorbita (Ea).....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6 Comportamenti spettrali di diversi elementi.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 7 esempio di area test e controllo. (a) immagine presa da Google Earth Pro dell'area test F_T5 e delle aree controllo F_Ca5 e F_Cb5 in fase di ante operam (2019). Figura 2.3(b) confronto in post opera (2023)</i>	<i>17</i>
<i>Figura 8 Localizzazione delle 6 aree test delle Cerrete lungo il tracciato</i>	<i>18</i>
<i>Figura 9 inquadramento geografico delle faggete eutrofiche nel tracciato.</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10 inquadramento geografico delle aree test dei Ginepreti lungo il metanodotto</i>	<i>20</i>
<i>Figura 11 inquadramento geografico delle aree test degli ostrieti lungo il metanodotto.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 12 Inquadramento geografico delle aree test dei Pioppeti golenali lungo il metanodotto</i>	<i>22</i>
<i>Figura 13 inquadramento geografico delle aree test dei Saliceti di greto lungo il metanodotto.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 14 inquadramento geografico delle aree test dei querceti lungo il metanodotto.</i>	<i>24</i>

<i>Figura 15 Script di GGE. Al centro area test F_T5, in alto a destra il grafico dell'andamento stagionale rappresentato dal valore dell'NDVI (Google, 2024).....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 16 NIR e RED rappresentano la riflettanza delle bande dell'infrarosso vicino e del rosso.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 17. Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei boschi di cerro attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 18. Variazioni medie dei valori NDVI nei boschi di cerro attraversati dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 19 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei boschi di ginepro attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 20 Variazioni medie dei valori NDVI nei boschi di ginepro attraversati dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei pioppeti attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 22 Variazioni medie dei valori NDVI nei pioppeti attraversati dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 23 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei querceti a roverella attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.....</i>	<i>39</i>

<i>Figura 24</i> Variazioni medie dei valori NDVI nei querceti a roverella attraversati dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.....	40
<i>Figura 25</i> Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nelle faggete attraversate dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.....	41
<i>Figura 26</i> Variazioni medie dei valori NDVI nelle faggete attraversate dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.....	42
<i>Figura 27</i> Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) negli ostrieti attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.....	43
<i>Figura 28</i> Variazioni medie dei valori NDVI negli ostrieti attraversate dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.....	44
<i>Figura 29</i> Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei saliceti attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.....	45
<i>Figura 30</i> “caso studio” dell'area controllo ID_L2_TR4_CA5. Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde). La prima immagine (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda immagine (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza illustra la variazione delle medie annuali dell'NDVI nell' area test e di controllo.....	46
<i>Figura 31</i> Variazioni medie dei valori NDVI nei saliceti attraversate dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.....	47
<i>Figura 32</i> Variazioni medie dei valori NDVI di tutte le aree attraversate dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.....	49
<i>Figura 33</i>	Errore. Il segnalibro non è definito.

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA TESI

L'utilizzo del gas naturale come risorsa energetica è piuttosto recente; il gas naturale rappresenta l'ultima fonte di energia fossile sfruttata a livello mondiale. Nei secoli precedenti venivano utilizzati combustibili fossili solidi (carbone) o liquidi (petrolio), ma tra la fine dell'Ottocento e inizi del Novecento iniziarono a diffondersi tecnologie per trasportare il gas naturale anche a grandi distanze grazie a navi metaniere, gasdotti e metanodotti. Nella seconda metà del Novecento l'utilizzo del gas naturale si diffuse presto anche in Europa in particolar modo in Olanda, Russia, Romania e Italia (Ecoage, s.d.).

Negli ultimi ottanta anni la quantità di metanodotti in Italia è aumentata notevolmente, ad oggi in totale sono presenti nel nostro territorio 32862 Km. (Snam S.p.A, 2024)



Figura 1 rete nazionale dei gasdotti (Snam S.p.A, 2024)

Per la realizzazione di un metanodotto sono necessarie lavorazioni abbastanza invasive per quanto riguarda il paesaggio e data la cospicua diffusione delle condotte è facile pensare all'impatto creato alla biodiversità dei nostri ecosistemi.

La messa a dimora di un metanodotto è un procedimento che richiede un lungo periodo di monitoraggio ambientale. L'osservazione è divisa in tre fasi: *ante operam* (prima della realizzazione del metanodotto), *corso d'operam* (durante le lavorazioni) e *post operam* (dopo le lavorazioni). Il monitoraggio ambientale è necessario per seguire e valutare il processo di

ripristino della vegetazione interferita e si pone come obiettivo il completo recupero della funzionalità ecosistemica. Sono utilizzate 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 S.p.A, 2024). L'obiettivo dei ripristini della vegetazione, in particolare dei rimboschimenti, non è la sola ricostituzione delle aree boschive, ma è la generale ricomposizione del paesaggio e la ripresa della funzionalità biologica delle aree vegetate, intese soprattutto nel loro ruolo di habitat faunistico con specifiche caratteristiche di biodiversità. Gli studi ambientali svolti in *ante operam* vengono fatti per conoscere le condizioni della zona prima che venga alterata dalle lavorazioni per la messa a dimora del metanodotto. Il monitoraggio ambientale è necessario per seguire e valutare il processo di ripristino della vegetazione interferita e si pone come obiettivo il completo recupero della funzionalità ecosistemica. Durante la fase di progettazione, il tracciato è scelto in maniera tale da minimizzare il più possibile il contatto con zone antropizzate, con aree di particolare interesse paesaggistico e con aree geologicamente instabili. Le valutazioni sono fatte tramite procedure complesse come la Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) del quale ha la finalità di rilasciare dalle amministrazioni preposte le autorizzazioni dalla normativa vigente (Snam S.p.A, 2024).

Per il controllo del ripristino ambientale degli ecosistemi alterati dalle lavorazioni, vengono fatti dei confronti tra le condizioni iniziali definite in "*ante operam*" e le condizioni presenti dopo lo smantellamento dei cantieri "*post operam*". In tutte le fasi del recupero vegetativo sono svolti dei periodici monitoraggi su tutti i settori danneggiati dalle lavorazioni (geognostiche, idrologiche, botaniche, vegetazionali, faunistiche, paesaggistiche, etc.) (Snam S.p.A, 2024).

Per verificare il regolare recupero delle funzionalità ecosistemiche, delle aree degradate dalle lavorazioni, sono necessari periodici interventi sul campo. La quantità di tempo e denaro richiesti da parte dell'ente gestore per svolgere i sopralluoghi sono fattori limitanti, che causano difficoltà nell'effettuare le numerose osservazioni.

Negli ultimi anni è sempre più utilizzato il telerilevamento come strumento di studio nel settore dei monitoraggi ambientali. Il telerilevamento è una disciplina tecnico scientifica o scienza applicata con finalità diagnostico-investigative che permette di ricavare informazioni, qualitative e quantitative sull'ambiente interessato da un sensore mediante misure di radiazione elettromagnetica (emessa, riflessa o trasmessa) che interagisce con le superfici d'interesse (Gomasca, 2012). Grazie al telerilevamento si possono ottenere informazioni dell'ambiente che ci circonda senza che lo strumento usato per raccogliere le informazioni sia

a contatto diretto con l'oggetto studiato. In questo caso il telerilevamento offre un importante contributo agli studi di caratterizzazione della vegetazione nella fase di *ante operam*, ma anche nell'analisi della rinaturalizzazione in *post operam*.

La possibilità di estrapolare in continuazione dati relativi allo stato fisiologico delle piante rende possibile ottenere una precisa caratterizzazione *ante operam* e *post operam*. I dati di campo possono essere affiancati da quelli remoti, permettendo vantaggi dal punto di vista pratico e tempistico.

Il principale indicatore da satellite utilizzato per fornire dati relativi alla presenza di vegetazione sulla superficie terrestre è l'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). L'indice viene calcolato usando immagini satellitari con la partecipazione di sensori montati sui satelliti che sono capaci di acquisire le onde del rosso (R: $0,7\mu\text{m}$) e vicino infrarosso (NIR: $0,9\mu\text{m}$). Viene valutata la presenza di attività fotosintetica, in quanto mette in relazione lo spettro del rosso dove avviene l'assorbimento da parte dei pigmenti fotosintetici e quello del vicino infrarosso in cui le foglie riflettono la luce. I valori dell'indice sono compresi tra -1 e 1, quelli della vegetazione sono valori maggiori di 0,2 (ARPAE, 2024).

Le risposte spettrali registrate si differiscono in base alle classi vegetative e dallo stato fisiologico della pianta. Questa caratteristica facilita la realizzazione di una mappa della vegetazione e del monitoraggio delle aree interessate alle lavorazioni.

L'obbiettivo della tesi è quello di capire se grazie al supporto del telerilevamento è possibile monitorare la rinaturalizzazione delle aree colpite del passaggio del metanodotto. La tesi intende dare continuità ed estensione a quella iniziata da Cecchini (Cecchini, 2021) analizzando un arco temporale più lungo ed un numero di categorie vegetazionali maggiore per ottenere una robustezza nei risultati superiore. Grazie alle serie temporali (traiettorie) telerilevate, delle aree osservate, si vuole capire se la metodologia possa essere un valido strumento (complementare a quello di campo) per monitorare da remoto il processo di ripristino della vegetazione. Questa tecnologia può fornire un supporto alle analisi fatte sul campo e verifiche nel dettaglio per quanto riguarda il recupero delle condizioni *post operam*.

Capitolo 1

Materiali e metodi

1.1 Metanodotto Rimini-Sansepolcro

La tesi è incentrata sul nuovo metanodotto che parte da Rimini (RN) e arriva a Sansepolcro (AR), in sostituzione della condotta dismessa ormai obsoleta. Il nuovo metanodotto, di lunghezza pari a 74,5 Km, sostituirà totalmente l'esistente per 68,6 km aggiungendosi ai 6 Km di varianti locali e contribuirà ad accrescere la flessibilità nell'esercizio di sistema di trasporto di gas naturale anche in relazione a possibili sviluppi della rete (Saipem S.p.a., 2017).

Il nuovo metanodotto attraversa molteplici comuni e provincie delle regioni Emilia-Romagna e Toscana come dettagliato nella tabella presente nella tesi di Giammarco Cecchini (Cecchini, 2021)



Figura 2 Il percorso del metanodotto Rimini-Sansepolcro. (a) inquadramento nelle regioni Emilia-Romagna e Toscana (b) dettaglio del percorso del metanodotto Rimini-Sansepolcro

1.2 Caratterizzazione vegetazionale

L'analisi vegetazionale permette di conoscere le comunità vegetali presenti in un determinato territorio nella complessa articolazione biogeografica, strutturale e tassonomica. Ciò consente di valutare quel territorio sia in termini di ricchezza che di diversità di specie e fitocenotica (ISPRA, 2010).

Le comunità e le specie vegetali presenti nelle aree di intervento fanno riferimento allo studio di impatto ambientale svolto dalla Saipem in fase di *ante operam* (Saipem S.p.a., 2017). Il quadro della caratterizzazione vegetazionale serve all'ente gestore per avere un riferimento della situazione in fase di *ante operam*, per poter essere ripristinato una volta finite le lavorazioni. La tabella riportata in seguito (figura 3) è stata realizzata da Giammarco Cecchini (Cecchini, 2021).

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	
Ostreti	113,6	1,97	
Vegetazione ruderale	102,1	1,77	
Vigneti	100,6	1,74	
Robinieti	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	

Figura 3 Superfici espresse in ettari delle varie tipologie vegetative e degli habitat ottenuti dall'analisi vegetazionale condotta dalla Saipem nello studio di impatto ambientale delle aree impattate dal metanodotto in fase di ante operam

1.3 Cenni sul telerilevamento

Il telerilevamento (remote sensing) ovvero l'osservazione della terra dallo spazio è la metodologia utilizzata per ottenere informazioni inerenti ad un oggetto, attraverso l'analisi di dati acquisiti da uno strumento (nel caso specifico, un sensore montato su un vettore) che non è a contatto diretto con l'oggetto indagato. I sensori utilizzati registrano le diverse modalità di riflettere l'energia elettromagnetica da parte degli oggetti presenti sulla superficie terrestre. I

dati così acquisiti restituiscono informazioni sugli oggetti analizzati (LILLESAND T.M., 1999).

La luce è la porzione dello spettro elettromagnetico che risulta visibile all'occhio umano. Tale intervallo è definito spettro visibile ed è compreso tra le lunghezze d'onda di circa 700 e 400 nanometri corrispondenti rispettivamente alla luce rossa e violetta. Le regioni dello spettro adiacente prendono il nome rispettivamente di radiazione infrarossa e ultravioletta.

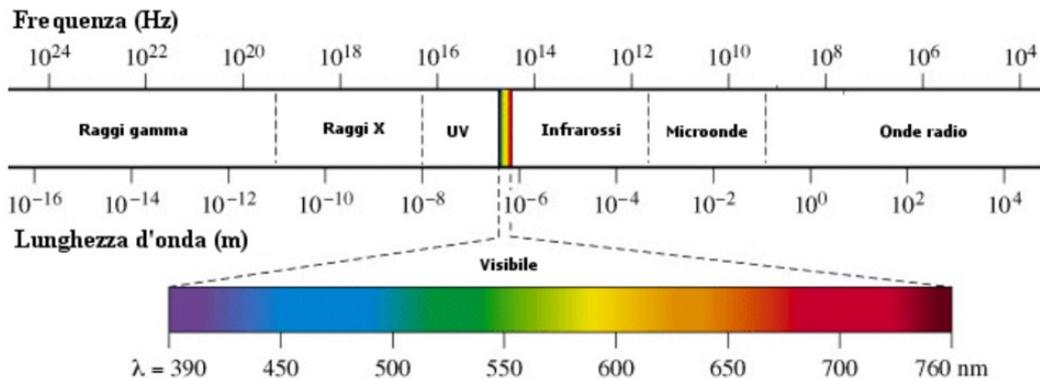


Figura 4 Spettro elettromagnetico

Dallo spettro elettromagnetico vengono ottenute delle “porzioni” di valori. A ciascuna porzione dello spettro può essere associato un campo di applicazione:

- **Raggi gamma:** sono radiazioni ad onde corte (<0,03 nm) con un elevato contenuto energetico. Sono utilizzati per catturare immagini di oggetti non osservabili con i soli raggi X (0,03-300 nm) come per l'interno del corpo.
- **Raggi X:** sono tra le radiazioni con più energia, sono utilizzate per “vedere” laddove le radiazioni a minore energia non riescono a passare. Utilizzati in campo medico per la radiografia ma anche negli aeroporti per controllare all'interno dei bagagli.
- **Radiazione ultravioletta:** sono le radiazioni energetiche più “vicine” al visibile. Hanno una lunghezza d'onda che va da 0,28-0,40 μm . I raggi UV sono divisibili in base alla lunghezza d'onda: il vicino ultravioletto (UV-A 0,32-0,40 μm), il lontano infrarosso (UV-B, 0,28-0,32 μm) e L'ultravioletto estremo (UV-C, <0,28 μm).
- **Porzione del visibile:** occupa l'intervallo che va da 0,4 a 0,7 μm . E' la porzione dello spettro più conosciuta e anche con il minor range di energia. La luce visibile è divisa in tre segmenti, i colori primari: da 0,4 a 0,5 μm la luce riflette il colore blu, da 0,5 a 0,6 μm il verde e da 0,6 a 0,7 μm il rosso.

- Regione Infrarossa: compresa tra 0.7 e 100 μm , è divisa in tre intervalli: infrarosso vicino (0.7-1,3 μm), l'infrarosso medio (1,3-3 μm), infrarosso lontano o infrarosso termico (3-100 μm).
- Microonde: regione dove le onde vanno da 0,1 a 100 cm.
- Onde radio: è la regione con le lunghezze d'onda maggiori, oltre i 100 cm (Campbell, 1996)

Le radiazioni elettromagnetiche utilizzate durante il telerilevamento devono oltrepassare le particelle e i gas presenti all'interno dell'atmosfera, questi possono ridurre le onde in entrata e l'immagine ottenuta può risultare disturbata.

Gli elementi di maggiore disturbo della radiazione solare sono il vapore acqueo, il biossido di carbonio e l'ozono. I gas citati assorbono l'energia solare in bande di lunghezza d'onda specifica, l'assorbimento della radiazione solare varia in base alla lunghezza d'onda. L'atmosfera risulta sufficientemente trasparente solo ad alcuni intervalli di lunghezza d'onda chiamati finestre atmosferiche. Le onde elettromagnetiche all'interno di queste finestre possono, dopo essere riflesse o emesse dalla superficie terrestre, attraversare l'atmosfera per essere rilevate da appositi sensori (Perego, 2015).

Quando un'onda elettromagnetica (energia incidente totale) colpisce un oggetto o una superficie qualsiasi sono possibili tre fondamentali interazioni: riflessione, assorbimento e trasmissione.

- Riflessione: parte della radiazione viene riflessa (diffusa) dall'oggetto bersaglio a diverse angolazioni.
- Assorbimento: è la parte della radiazione che viene assorbita attraverso interazioni molecolari o elettroniche del materiale
- Trasmissione: parte della radiazione penetra in alcuni mezzi come ad esempio l'acqua.

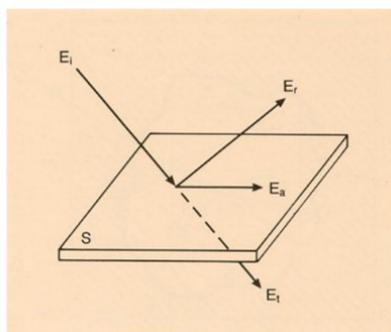


Figura 5 Ripartizione energia incidente (E_i) su una superficie in: energia trasmessa (E_t), riflessa (E_r) e assorbita (E_a)

La quantità di energia riflessa, trasmessa e assorbita varia in funzione della natura fisica delle superfici e dal loro grado di irregolarità superficiale

La riflettanza è la grandezza adimensionale che misura la riflessione, ovvero il rapporto d'intensità della radiazione riflessa ed intensità della radiazione incidente. La riflessione non è uguale per tutti gli oggetti, ad esempio gli specchi producono una riflessione speculare mentre oggetti opachi hanno una riflessione diffusa, quasi perfetta (Lambertiana). La maggior parte degli oggetti presenti in natura danno forma a una riflessione di tipo mista.

Ogni elemento presente nella superficie terrestre interagisce in maniera differente alla radiazione incidente, generando una propria "firma spettrale" (Galli, 2022).

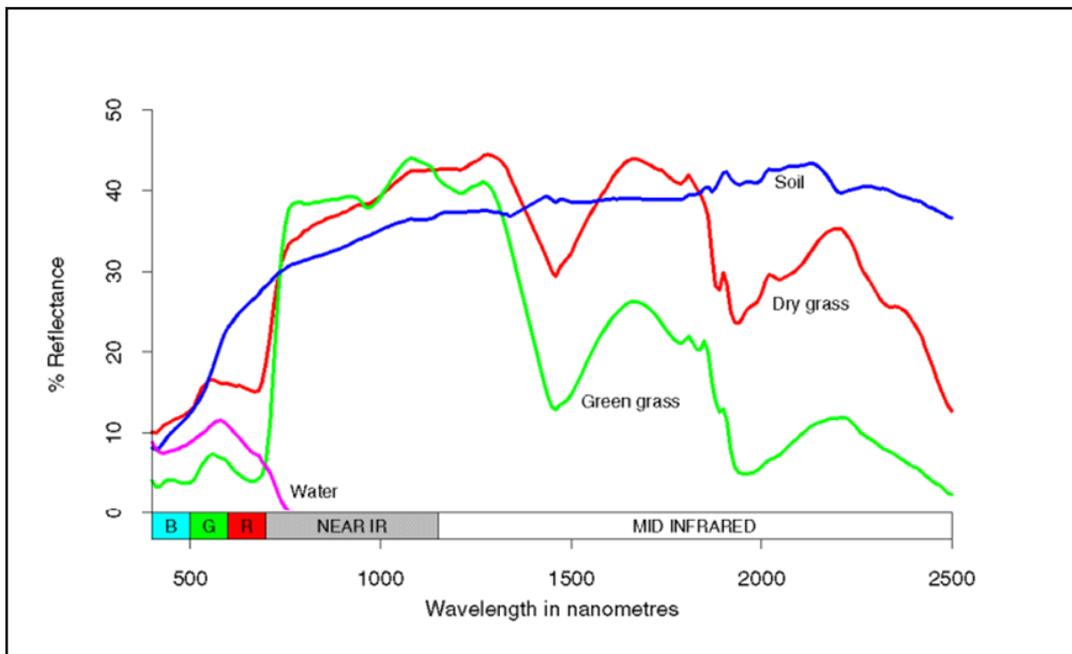


Figura 6 *Comportamenti spettrali di diversi elementi.*

1.4 Aree test

Grazie alla possibilità di utilizzare immagini storiche, presenti nel software Google Earth Pro (Google, 2024), è stato possibile realizzare un'analisi visiva ed interpretativa che ha permesso di confrontare la situazione in *ante operam* con quella di *post operam*, evidenziando il passaggio del metanodotto. La figura sottostante (Figura 7) mostra un esempio di un confronto temporale tra *ante operam* e *post operam*, dove l'area evidenziata in rosso (area test) rappresenta la superficie impattata dal metanodotto pertanto soggetta a monitoraggio del ripristino vegetativo. L'area evidenziata in verde (area controllo) è un punto di riferimento

utilizzato per valutare nel tempo l'evolversi dei ripristini vegetativi effettuati nell'area test. Nel caso sotto riportato sono evidenziate due aree controllo dato che la conformazione territoriale ne permetteva la creazione.

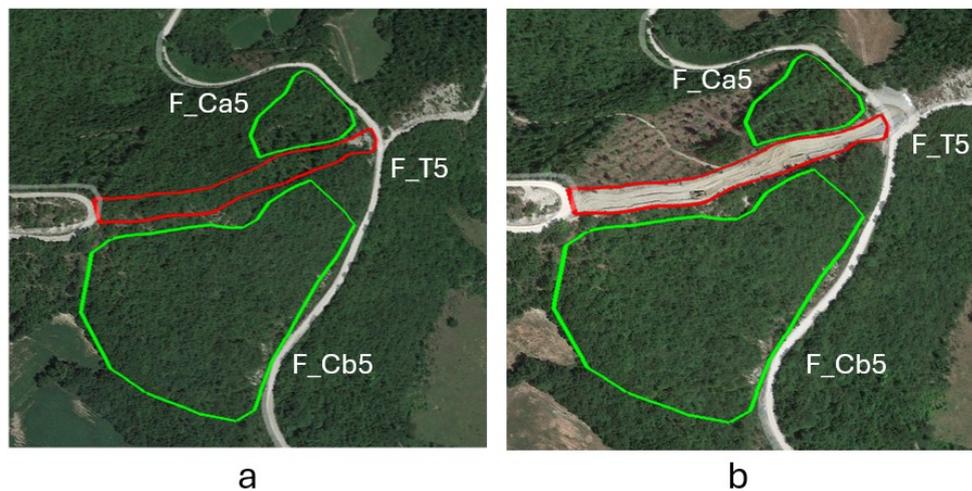


Figura 7 Esempio di area test e controllo. (a) immagine presa da Google Earth Pro dell'area test F_T5 e delle aree controllo F_Ca5 e F_Cb5 in fase di ante operam (2019). Figura 2.3(b) confronto in post opera (2023)

Nelle zone in cui sono stati osservati tratti di vegetazione più rappresentativi e meglio conservati dal punto di vista naturalistico, sono state aggiunte le stazioni di monitoraggio, così da poter controllare il livello di interferenza prodotto durante le varie fasi delle lavorazioni. Inoltre, la localizzazione delle aree test ha tenuto conto della biodiversità, cercando di individuare più habitat, con l'obiettivo di monitorare le diverse risposte in seguito al dinamismo evolutivo delle varie fitocenosi sottoposte a disturbo. In totale sono state prese in considerazione sette distinte categorie vegetazionali, come riportato più dettagliatamente nella tabella 1. Per quanto riguarda le aree monitorate sono 69, divise in 29 aree test e 40 aree controllo.

L'analisi vegetazionale svolta dalla Saipem (Saipem S.p.a., 2017) in fase di *ante operam* ha permesso di semplificare l'approccio di studio del tracciato facilitando la classificazione vegetazionale. La carta vegetazionale è stata utilizzata per l'individuazione delle aree test e controllo, con l'utilizzo del GIS è stato possibile attribuire alle aree monitorate la corrispettiva categoria vegetazionale e in seguito per l'inquadramento geografico delle superfici monitorate. Di seguito viene riportata la tabella riassuntiva per quanto riguarda le comunità vegetali e le superfici monitorate.

Tabella 1 elenco categorie vegetative, con le Aree Test (A.T.), Controllo (A.C.) e le rispettive Superfici (S.A.T. - S.A.C.). Nelle ultime due colonne sono riportate le superfici totali (S.TOT = S.A.T + S.A.C) e la relativa percentuale della copertura vegetazionale.

Vegetazione	Codice habitat	A.T.	A.C.	S.A.T.	S.A.C.	S. TOT	% S
Cerreta		6	11	40940,12	364508,66	405448,78	57,03%
Faggeta	9210	3	4	5606,56	28278,29	33884,85	4,77%
Ginepreti	5130	2	3	11320,3	46436,39	57756,69	8,12%
Ostrieti		3	4	10699,67	41691,01	52390,68	7,37%
Pioppeti	92A0	8	10	35522,28	69516,41	105038,69	14,78%
Querceti a roverella	91AA	3	4	3786,2	19047,51	22833,71	3,21%
Saliceti arbustivi	3240	3	3	10716,16	4454,66	15170,82	2,13%
TOTALE		29	40	120342,8	590563,13	710905,94	100,00%

Come detto in precedenza, l'analisi del metanodotto è stata divisa secondo classi vegetazionali, in seguito vengono riportate le immagini delle aree test di ciascuna tipologia vegetativa e la loro dislocazione geografica.



Figura 8 Localizzazione delle aree test delle Cerrete lungo il tracciato

Dall'analisi vegetazionale (figura 3) è emerso che la tipologia vegetazionale più diffusa sono le Cerrete, con un'area di 1576,8 ha ovvero il 27,34% sull'area totale, ragione per cui sono state individuate 17 aree (test e controllo). La superficie totale delle aree riguardante le cerrete occupa il 57% dell'intera area monitorata.

Le aree F_T3, ID_L2_TR5_A2 e ID_L2_TR4_A1 ricadono all'interno della regione Toscana, ID_L2_TR4_A2, F_T4 e ID_L2_TR4_A3 sono situate in Emilia-Romagna.

Si tratta di boschi semidecidui a dominanza di cerro (*Quercus cerris*), farnetto (*Q. frainetto*) o rovere (*Q. petraea*), tendenzialmente silicicoli e subacidofili, da termofili a mesofili, pluristratificati. Sono collocati nel piano bioclimatico Supramediterraneo, Submesomediterraneo e mesotemperato (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007).



Figura 9 *inquadramento geografico delle aree test delle faggete lungo tracciato.*

Il secondo inquadramento tratta della faggeta eutrofica. Sono presenti 29,9 ha di superficie boscata riguardante la cenosi interessata che rappresenta lo 0,52% dell'area totale del metanodotto (Saipem S.p.a., 2017).

Tutte le aree monitorate si trovano nella regione Toscana e rientrano nell'habitat 9210, ovvero faggeti degli appennini con *Taxus* e *Ilex*, più precisamente si collocano nella Riserva Naturale Alpe della Luna (Habitat nei Siti Natura 2000, Regione Toscana, 2019).

Si tratta di una matrice boscata continua, a dominanza di boschi di latifoglie mesofile (faggete e querceti). L'elevata naturalità delle formazioni vegetali e lo scarso disturbo antropico rendono le faggete dell'Alpe della Luna una particolare ricchezza di specie rare (Habitat nei Siti Natura 2000, Regione Toscana, 2019).



Figura 10 inquadramento geografico delle aree test dei ginepreti lungo il metanodotto

La classe vegetativa dei ginepreti occupa lo 0,97% della vegetazione totale presente nel tracciato che equivalgono a 55 ha (Saipem S.p.a., 2017).

I ginepreti presenti nel tracciato rientrano nell'habitat 5130 che considera arbusteti submediterranei e temperati, più precisamente formazioni a *Juniperus communis* su lande o prati calcicoli. Originatosi per invasione di prati pascoli o coltivi abbandonati, i ginepreti sono cenosi diffuse su versanti collinari e montani a diverse esposizioni e pendenza, privilegiando substrati da carbonatici a debolmente acidofili, preferibilmente argillosi. con dominanza o abbondanza di ginepro comune (*Juniperus communis*) presenti dall'alta pianura alla fascia montana.

Le fitocenosi a ginepro comune si presentano generalmente come un arbusteto mai troppo chiuso, in cui la specie dominante *Juniperus communis* risulta associata con altri arbusti (*Rosa canina*, *Crataegus monogyna*, *Prunus spinosa*) (Foggi, 2017).

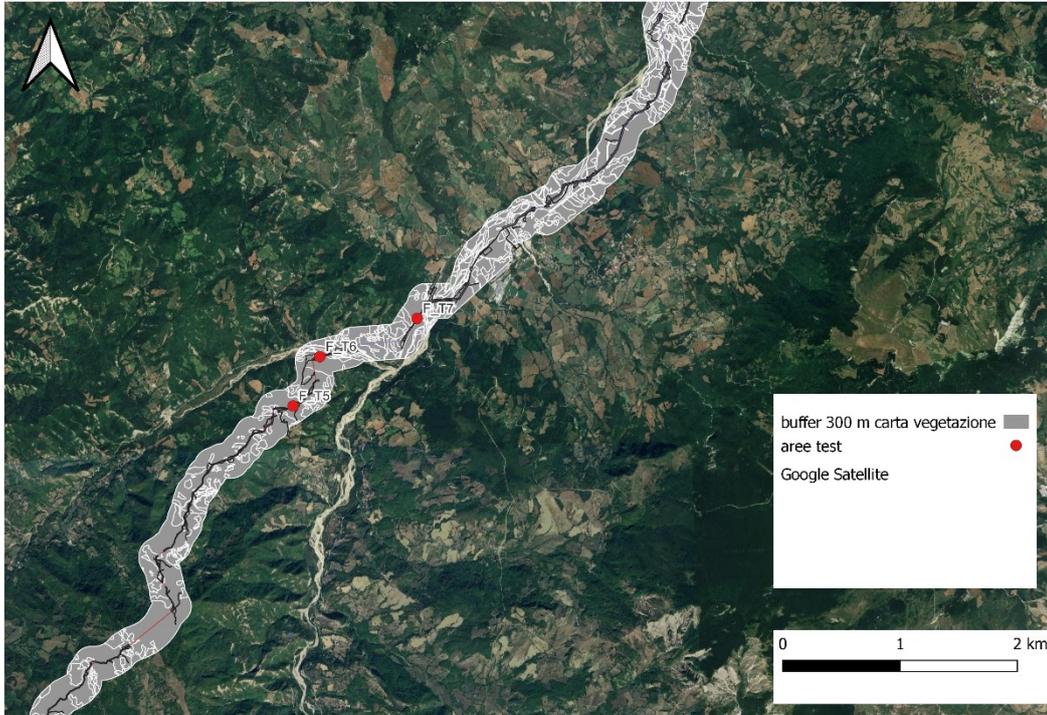


Figura 11 inquadramento geografico delle aree test degli ostrieti lungo il metanodotto.

Tutte le aree monitorate si trovano nella regione Emilia-Romagna, più precisamente nell'appennino tosco emiliano.

La superficie totale degli Ostrieti impattata dal metanodotto è di 113 ha che equivalgono all'1,97% dell'area totale (Saipem S.p.a., 2017).

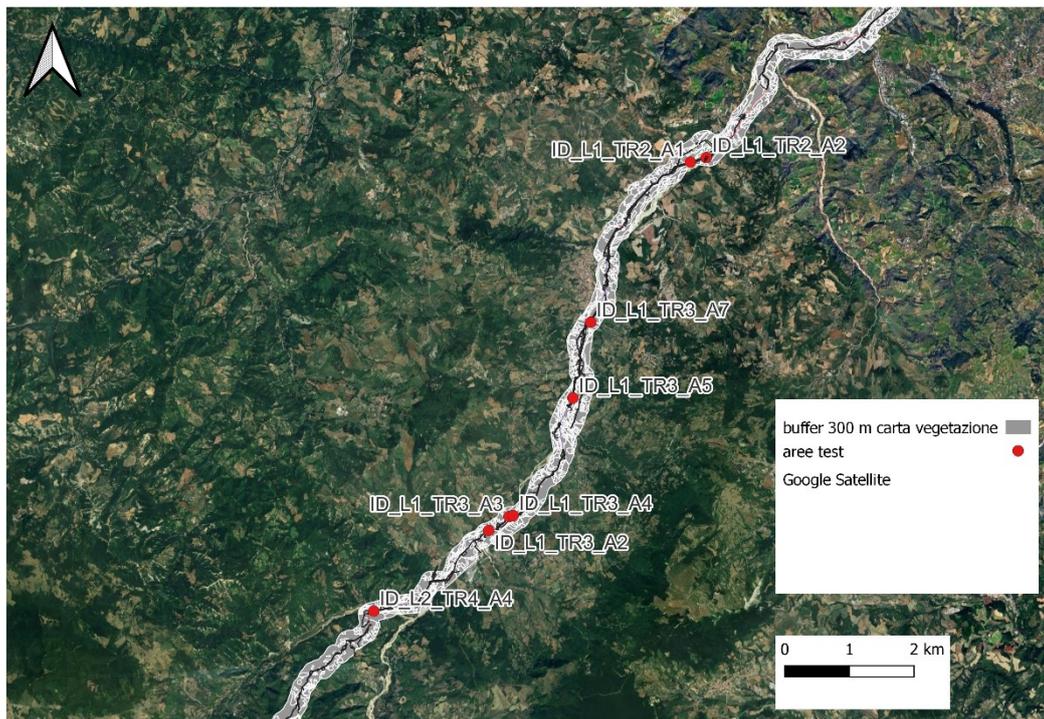


Figura 12 Inquadramento geografico delle aree test dei Pioppeti golenali lungo il metanodotto

I pioppeti golenali rappresentano una delle due classi vegetative ripariali presenti nella biocenosi scelta per il monitoraggio ambientale. Sono state individuate 8 aree test e 10 aree controllo e sono la classe vegetativa con più aree test. Sono presenti 261,3 ha di pioppeti golenali che corrispondono al 4,53% della copertura vegetazionale presente sul tracciato (Saipem S.p.a., 2017).

Le aree interessate al passaggio del metanodotto ricadono tutte nella regione dell'Emilia-Romagna, secondo il manuale habitat Regione Emilia-Romagna (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007) le associazioni di *Populus alba* e *Salix alba* formano l'habitat 92A0. Questo tipo di habitat comprende boschi ripariali di salice bianco e pioppo bianco dell'ordine *Populetalia albae*. L'identificazione di tale habitat è in genere semplice in quanto riguarda la riva fluviale a salici e pioppi arborei la cui vegetazione caratteristicamente occupa l'interno degli argini, in questo caso del fiume Marecchia, fino al bordo con le caratteristiche fronde che "ricadono" in acqua determinando un "effetto galleria" sulla fascia soggetta alla dinamica fluviale.

L'ecosistema svolge un ruolo ecologico importante e variegato: entra nella regimazione delle acque, protegge la riva dall'erosione fluviale, edifica una fascia tampone fra coltivi e ambiti

fluviali per i prodotti ammendanti e anticrittogamici usati in agricoltura e pioppicoltura (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007).

È un habitat molto diffuso, in presenza di situazioni ripariali lo stadio prevalente è quello arboreo, la velocità di crescita è rapida in presenza di seme e condizioni idonee di sviluppo (suoli da idromorfi a drenati), ha infatti spesso carattere di vero e proprio habitat pioniero. Oltre ai salici e pioppi (arborei) indicati, entrano nella composizione specifica gli ontani, *Acer campestre*, *Ulmus minor*, *Fraxinus oxycarpa* e *Morus sp.*, per la componente arbustiva *Salix triandra*, *S. cinerea* e *Sambucus nigra* (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007).

La vegetazione fluviale è un ecosistema abbastanza dinamico e permette quindi di validare la tecnologia proposta.

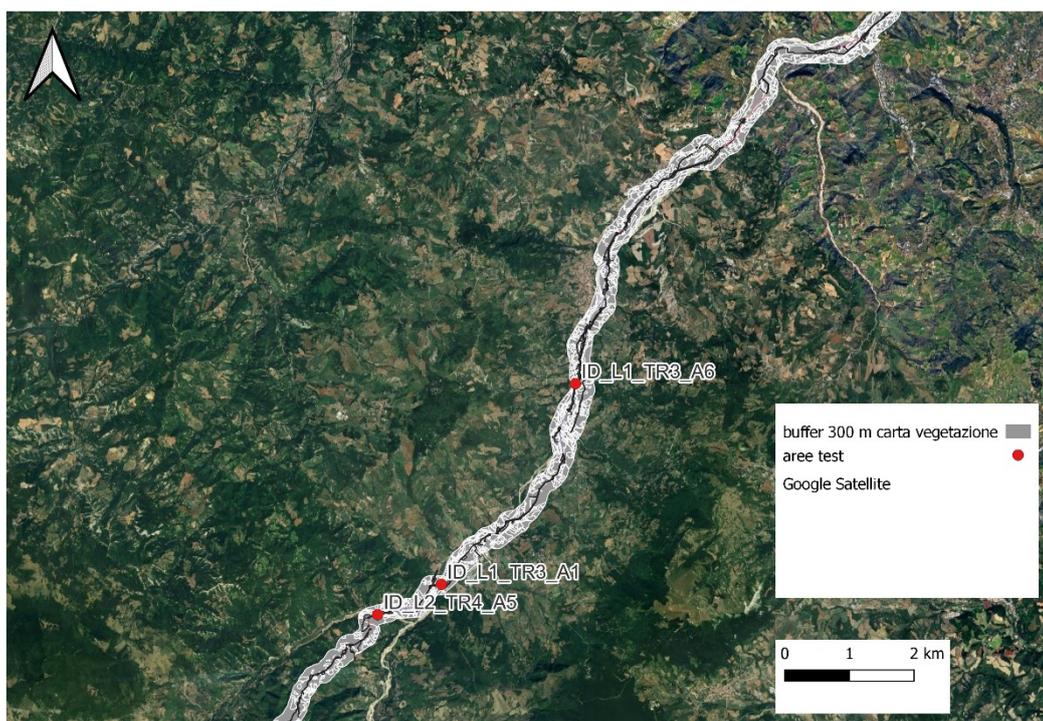


Figura 13 *inquadramento geografico delle aree test dei Saliceti di greto lungo il metanodotto.*

Come già detto per i Pioppeti golenali anche i Saliceti arbustivi di greto sono particolarmente presenti lungo il tracciato dato le spiccate intersezioni del metanodotto con il fiume Marecchia.

Le aree monitorate ricadono tutte nella regione Emilia-Romagna. La cenosi è costituita principalmente da specie erbacee e arbustive e rientrano a far parte dell'habitat 3240.

L'habitat comprende formazioni arboreo-arbustive formate da *Salix sp.* e *Hippophae rhamnoides* su greti ciottolosi di fiumi con adeguata alimentazione idrica diretta o di falda superficiale, frequentemente perturbati e ringiovaniti da piene ricorrenti che ne impediscono lo sviluppo verso forme più evolute. Sono stati interpretati come habitat sia i popolamenti arbustivi pionieri degli alvei fluviali a olivello spinoso (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007). È caratteristico un continuo ringiovanimento delle cenosi che ostacola l'evoluzione verso forme più stabili e mature: tale condizione tende a sfumare nei settori posti a maggior distanza dall'alveo (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007).

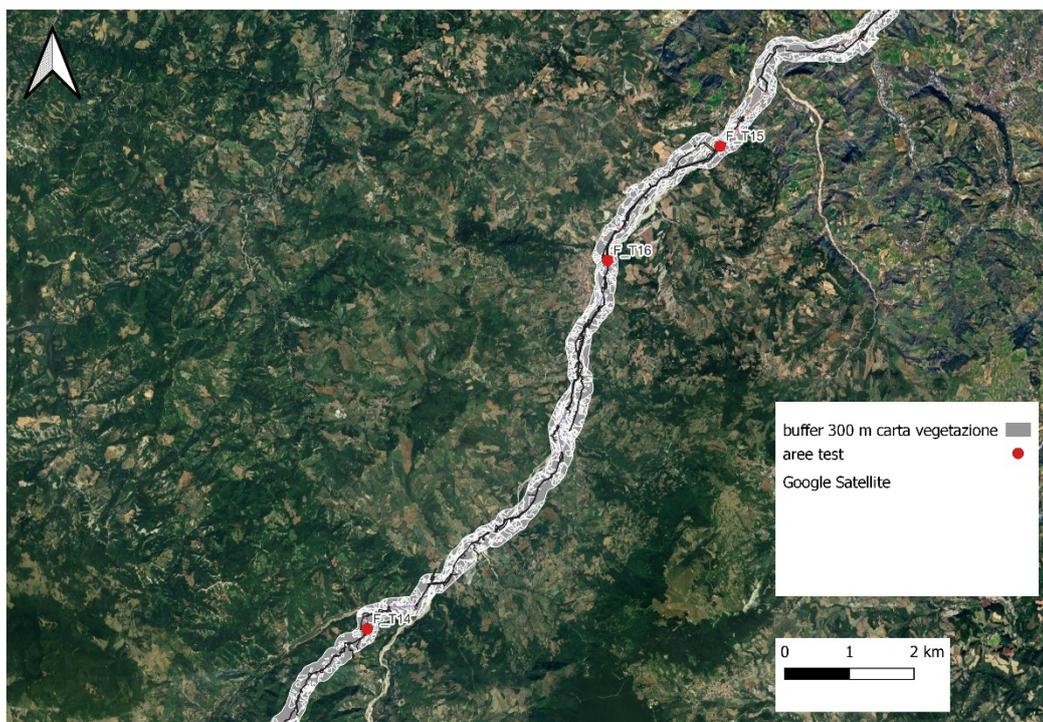


Figura 14 inquadramento geografico delle aree test dei querceti lungo il metanodotto.

L'ultimo inquadramento geografico riguarda i querceti a roverella neutrobasifili. La superficie totale dei querceti nel tracciato è di 198 ha, ovvero il 3,44% della vegetazione totale (Saipem S.p.a., 2017). Le aree monitorate sono tutte collocate nella regione Emilia-Romagna, nell'Appennino Tosco-Emiliano.

Le formazioni forestali submediterranee a dominanza di *Quercus pubescens* e *Fraxinus ornus* rientrano nell'habitat 91AA. I querceti in questione fanno parte dell'associazione Peucedano

cervariae-Quercetum pubescentis, questa è diffusa nelle aree collinari della Romagna sul flysch della formazione marnoso-arenacea e, nella bassa collina, su argille e marne (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007).

1.5 Serie temporali interannuali NDVI

Il monitoraggio ambientale è un processo valutativo che prevede la raccolta e l'analisi di dati sulle condizioni dell'ambiente. In questo lavoro i dati sono stati estrapolati dalle immagini satellitari, grazie all'utilizzo del software Google Earth Engine (Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. , 2017). I risultati ottenuti, successivamente, sono stati elaborati su Excel e hanno dato forma a grafici che mostrano con evidenza le traiettorie delle serie temporali.

Le serie storiche vengono studiate per interpretare un fenomeno, individuando componenti di tendenza, ciclicità e stagionalità, ma anche per un suo andamento futuro. In generale per serie si intende la classificazione di diverse osservazioni di un fenomeno rispetto ad un carattere qualitativo, se tale carattere è il tempo, la serie viene detta storica o temporale. Il fenomeno osservato, detto variabile, può essere osservato in dati istanti di tempo o alla fine di periodi di lunghezza definita (Di Fonzo, 2005).

In questa tesi sono state analizzate le serie temporali; viene descritta l'evoluzione dello stato fenologico e le traiettorie delle diverse coperture vegetali. Sono state prese in riferimento le serie temporali da Sentinel 2 e gli indici NDVI da Google Earth Engine (G.E.E.).

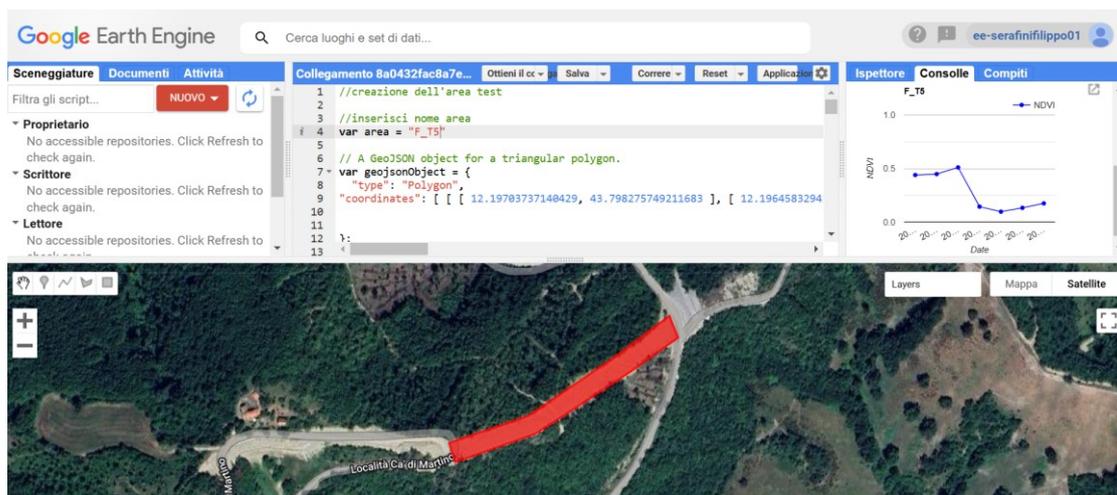


Figura 15 Script di G.E.E. Al centro area test F_T5, in alto a destra il grafico dell'andamento stagionale rappresentato dal valore dell'NDVI (Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. , 2017)

Il periodo preso in considerazione va da 06/2018 a 09/2024, il range temporale è di 7 anni. I risultati ottenuti dall'analisi ci permettono di confrontare la situazione *in ante operam* con quella attuale *in post operam*. Lo script G.E.E. utilizzato elimina i pixel coperti da nuvole favorendo una migliore analisi del territorio interessato.

1.5.1 Immagini satellitari

Un'immagine satellitare è una fotografia aerea, scattata da un satellite artificiale (solitamente satelliti per il telerilevamento o simili piattaforme), che rappresenta la terra, o altri pianeti dell'universo.

I satelliti digitali possono essere distinti in due tipologie ben definite: satelliti supportati da sensori multispettrali o da sensori iperspettrali. La sostanziale differenza tra queste due definizioni si basa essenzialmente sul numero di bande spettrali su cui lavorano le due tipologie di strumenti. Infatti, parliamo di sensori iperspettrali riferendoci a strumenti dotati di una risoluzione spettrale capace di misurare la radiazione riflessa in molte bande strette e contigue, ovvero per ogni banda di misura è acquisita una immagine, per ciascuna delle quali un pixel rappresenta la riflettanza ad una precisa lunghezza d'onda della zona di terreno vista da quel pixel (Microgeo, 2024). Alla base dei sistemi di telerilevamento iperspettrale vi è la proprietà fisica degli oggetti di emettere o riflettere radiazione su varie bande, oltre a quella visibile, con intensità variabile in funzione delle proprie caratteristiche chimico-fisiche. I sistemi di ripresa e analisi iperspettrali rappresentano una tecnica dalle grandi potenzialità, nel campo delle analisi ambientali.

Nel caso dei sensori multispettrali il numero di bande è inferiore rispetto quelli iperspettrali, consentendo raramente l'analisi del comportamento spettrale per ciascuna regione dello spettro su più di una sola banda

Le immagini satellitari utilizzate da Google Earth, sono state ottenute dal programma Copernicus per il monitoraggio delle aree verdi presenti del pianeta e fornire supporto nella gestione di disastri naturali. Il satellite si chiama Sentinel-2 ed è costituito da 2 satelliti identici (Sentinel-2A e Sentinel-2B).

La missione Sentinel-2 acquisisce immagini multispettrali in 13 bande del visibile e infrarosso. I satelliti sorvolano lo stesso punto sulla superficie terrestre con lo stesso angolo di visuale ogni 5 giorni. Le risoluzioni di dettagli al suolo di 10, 20 e 60 metri a seconda della banda dello spettro (Agenzia Spaziale Italiana, 2024).

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.

1.5.2 *Indice NDVI*

Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è un indice multispettrale fortemente correlato al contenuto di clorofilla e definito mediante la seguente formula:

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

Figura 16 NIR e RED rappresentano la riflettanza delle bande dell'infrarosso vicino e del rosso

Viene calcolato partendo da immagini satellitari prodotte da sensori che acquisiscono nel rosso (R: 0.7 µm) e vicino infrarosso (NIR: 0.9 µm). Valuta la presenza di attività fotosintetica, in quanto mette in relazione lo spettro del rosso, in cui c'è assorbimento da parte della clorofilla, e quello del vicino infrarosso in cui le foglie riflettono la luce per evitare il surriscaldamento. I valori dell'indice sono tipicamente compresi tra -1 e +1. La presenza di vegetazione assume valori maggiori di 0.2 (ARPAE, 2024).

Questo indice viene usato solitamente per realizzare carte vegetazionali mediante procedimenti automatizzati a partire da dati multispettrali. Ha trovato applicazione nel campo fitopatologico ed in particolare nel monitoraggio dello stato sanitario delle piante arboree.

Fattore importante da tenere in considerazione quando si usa l'indice NDVI è la correzione atmosferica, se si vogliono ottenere risultati il più attendibili possibile è necessario assicurarsi il fattore perturbante della nuvolosità o di altri effetti atmosferici.

1.6 Programmi utilizzati

1.6.1 *QGIS*

Nello specifico, QGIS Desktop 3.22.16 (QGIS, 2016) permette di visualizzare, organizzare, analizzare e rappresentare dati spaziali. Il software può essere utilizzato su diversi sistemi operativi come Microsoft Windows e macOS.

QGIS permette di far confluire dati provenienti da diverse fonti in un unico progetto di analisi territoriale. I dati, divisi in Layers, possono essere analizzati e da essi viene creata l'immagine mappa con il graficismo che può essere personalizzato dall'utente ed eventualmente rispondere alle analisi tipiche del GIS. In questo lavoro il programma è stato utilizzato principalmente per una classificazione ambientale e vegetazionale (Saipem S.p.a., 2017) e per la creazione delle aree test e controllo.

1.6.2 *Microsoft Excel*

È un programma dedicato alla produzione ed alla gestione di fogli elettronici. È disponibile per i sistemi operativi Microsoft Windows e macOS.

Nella tesi è stato utilizzato per la produzione di grafici che mostrano il confronto dell'andamento delle serie temporali di aree test e aree controllo. Il software è stato utilizzato anche per calcolare la percentuale di recupero del valore originale dell'NDVI.

1.6.3 *Google Earth Pro*

Google Earth 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 è un'applicazione grafica tridimensionale che permette di visualizzare fotografie aeree e satellitari della Terra con un dettaglio molto elevato. Mostra una rappresentazione tridimensionale del terreno mediante dati DEM (Digital Elevation Model) collezionati durante la missione NASA Shuttle Radar Topography Mission. (Google, 2024) Il programma è stato utilizzato per la realizzazione delle aree test e aree controllo poi rappresentate nella tesi.

1.6.4 *Google Earth Engine*

E' una piattaforma su scala planetaria per l'analisi dei dati ambientali, è uno strumento utilizzato per approfondire le conoscenze delle implicazioni dei cambiamenti climatici (Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. , 2017). Il software ha permesso di estrapolare il valore NDVI di ciascuna area test e controllo, prendendo in considerazione solo i valori stagionali estivi.

Capitolo 2

RISULTATI E DISCUSSIONI

2.1 Serie temporali NDVI aree test e controllo

Per ciascuna area test e controllo è stato creato un grafico che mostra le curve dei valori NDVI stagionali (serie temporali). Il recupero della rinaturalizzazione vegetazionale è stato monitorato attraverso l'NDVI. Il valore dell'ultimo anno monitorato (2024) è stato confrontato con il valore massimo registrato prima dell'intervento (2018 o 2019), calcolando così la percentuale di recupero rispetto al valore originale dell'area test. Per un ulteriore riscontro, lo stesso procedimento è stato applicato alle aree di controllo, sostituendo il valore *ante operam* dell'area test con la media dei valori delle aree di confronto.

Tabella 2: riepilogo categorie vegetative (disposte secondo il recupero di NDVI maggiore rispetto al valore originale delle relative aree test)

Tipologia vegetativa	Area test (%)	Area controllo (%)
Cerreta mesofila	56,70%	53,80%
Ginepreti	48,95%	46,46%
Pioppeti golenali	36,41%	35,18%
Querceti a roverella	29,12%	34,39%
Faggeta	29,77%	29,83%
Ostrieti	28,66%	26,00%
Saliceti arbustivi di greto	7,90%	6,30%

2.2 Cerrete subacidofile mesofile

Le aree test delle cerrete (vedi Figura 8 per la localizzazione) hanno mostrato ritmi di ripresa dei valori NDVI differenti dopo i lavori di posa del metanodotto. In alcune aree, il recupero della vegetazione è stato rapido, dove il valore NDVI, è arrivato a 0,750. Al contrario, altre aree hanno evidenziato un recupero significativamente più lento, con valori NDVI di 0,163 a quattro anni dai lavori (vedi Figura 17). Questa variabilità nei ritmi di recupero potrebbe essere

attribuita ai fattori topografici. In aree impluvianti o in condizioni che favoriscono una maggiore umidità edafica, supportata da precipitazioni e temperature favorevoli, il recupero della biomassa è stato facilitato. Al contrario, in aree esposte, come pendii o creste, le condizioni di aridità edafica e la presenza di suoli poveri hanno probabilmente influito negativamente sulla ripresa della vegetazione. Oltre alle cause naturali, è importante considerare l'impatto delle piantumazioni effettuate dagli enti gestori per il ripristino dell'ecosistema danneggiato. I valori NDVI osservati e le foto *post operam* (Figura 17) suggeriscono che la copertura vegetale nelle aree impattate dalle lavorazioni abbia raggiunto, al massimo, lo stadio di arbusteto.

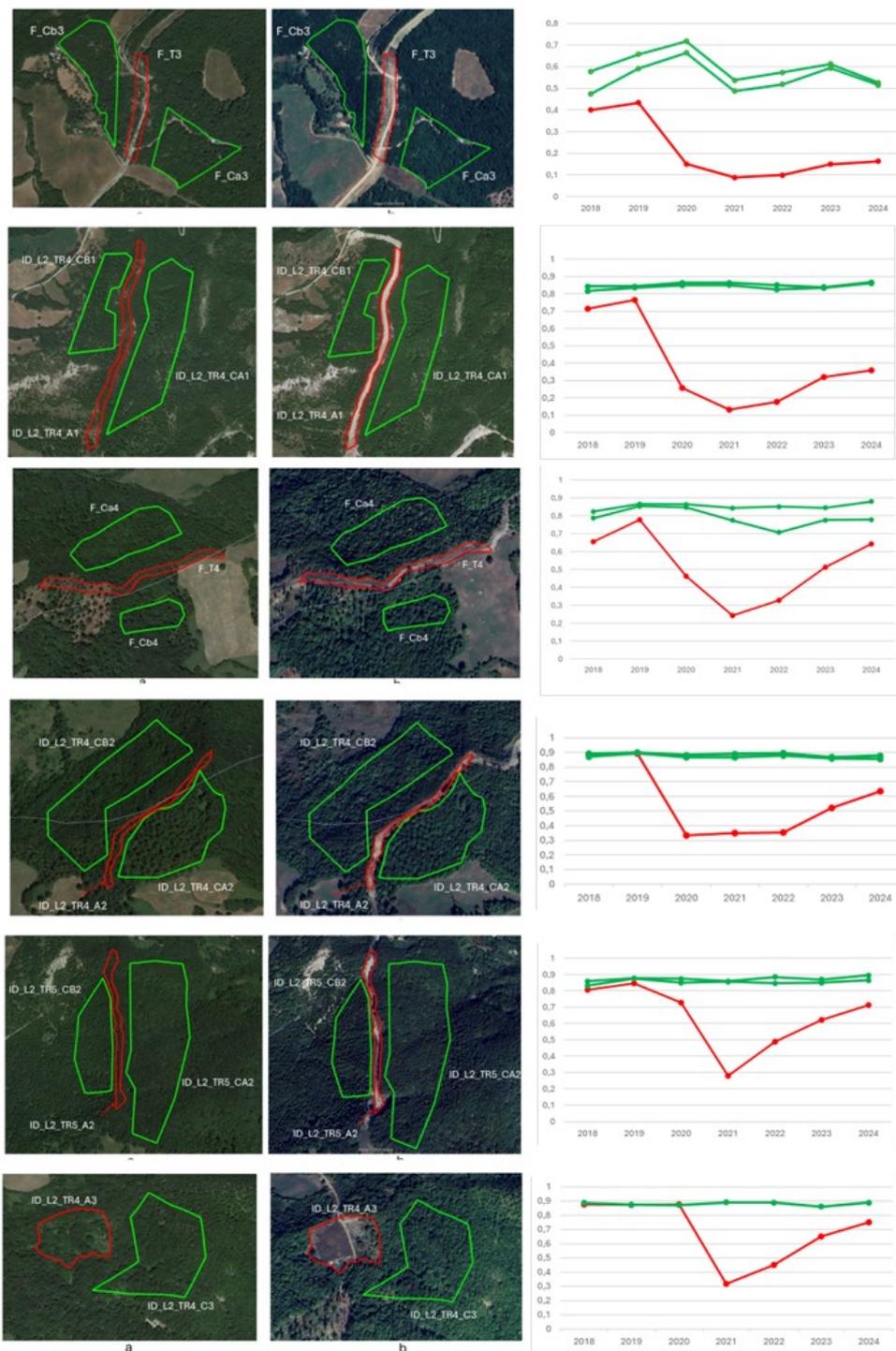


Figura 17. Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei boschi di cerro attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.

In figura 18 è rappresentata nel complesso la categoria delle cerrete riportando le traiettorie medie sia delle aree controllo che delle aree test. I valori NDVI medi delle aree test dei boschi di cerro hanno mostrato un recupero del 56,7% rispetto ai livelli *ante operam* (2018) e del 53,8% rispetto alle aree di controllo. Il punto più basso della curva si registra nel 2021, l'anno successivo al posizionamento della condotta, con un valore NDVI di 0,218. Dopo tre anni, il valore è salito a 0,509, indicando un incremento della biomassa vegetale, probabilmente associabile a uno stadio di arbusteto. Tuttavia, questi livelli restano significativamente inferiori ai valori tipici di un bosco maturo, che si attestano tra 0,7 e 0,9 (figura 18).

La curva NDVI delle aree di controllo fornisce un riferimento fondamentale per valutare il ripristino vegetativo, rappresentando lo stato di una cerreta in salute e priva di interventi antropici.

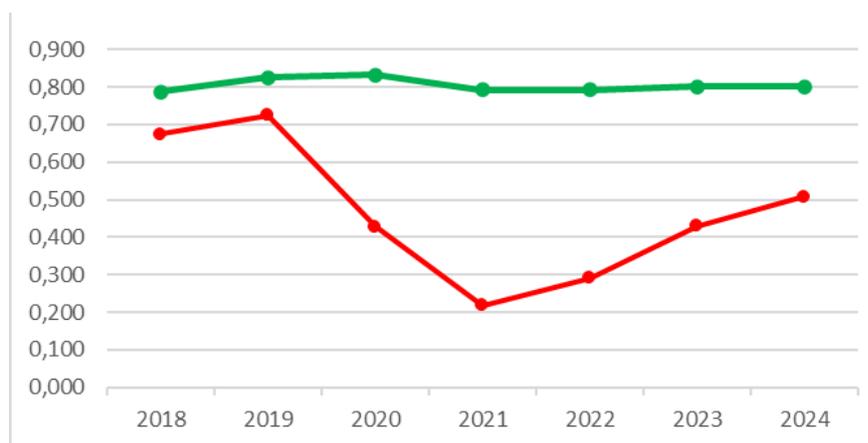


Figura 18. Variazioni medie dei valori NDVI nei boschi di cerro attraversati dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.

2.3 Ginepreti

La categoria dei ginepreti occupa lo 0,97% della vegetazione totale presente nel tracciato che equivalgono a 55 ha (Saipem S.p.a., 2017). Nel tracciato sono state evidenziate due aree impattate dal metanodotto (vedi figura 10 per la localizzazione) nominate F_T1 e F_T2. Nelle superfici monitorate la velocità del recupero vegetativo procede in maniera differente (vedi figura 19). In F_T1 il valore NDVI è di 0,275 mentre in F_T2 è di 0,618. Una possibile causa del minor recupero vegetativo dell'area F_T1 potrebbe essere stata la presenza della superficie stradale (vedi figura 19).

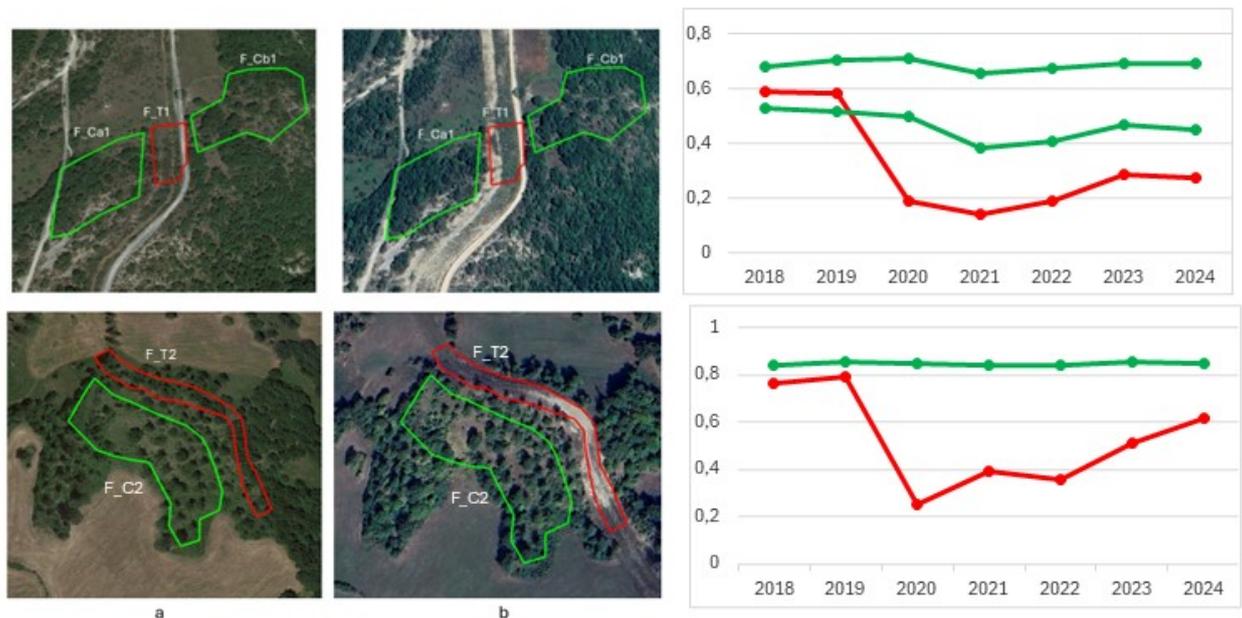


Figura 19 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei boschi di ginepro attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo.

In figura 20 è rappresentata nel complesso la categoria dei ginepreti riportando le traiettorie medie sia delle aree controllo che delle aree test. I valori NDVI medi delle aree test dei boschi di ginepro hanno mostrato un recupero del 48,9% rispetto ai livelli *ante operam* (2018) e del 46,5% rispetto alle aree di controllo. Il punto più basso della curva si registra nel 2020, l'anno del posizionamento della condotta, con un valore NDVI di 0,220. Dopo quattro anni, il valore è salito a 0,447, indicando un incremento della biomassa vegetale, probabilmente associabile a uno stadio erbaceo con arbusti. Tuttavia, questi livelli restano significativamente inferiori ai valori riscontrati in fase di *ante operam*, che si attestano tra 0,6 e 0,8 (figura 20).

La curva NDVI delle aree di controllo fornisce un riferimento fondamentale per valutare il ripristino vegetativo, delle corrispettive aree interessate. Date le diverse condizioni non è possibile aspettarsi un recupero omogeneo delle due superfici, vista la presenza di superficie stradale in F_T1.

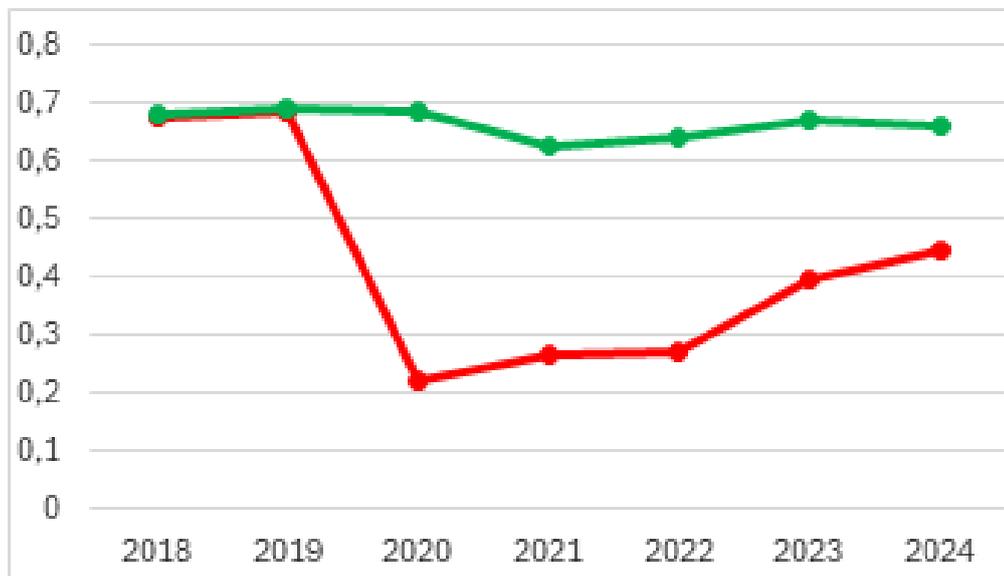


Figura 20 *Variazioni medie dei valori NDVI nei boschi di ginepro attraversati dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.*

2.4 Pioppeti golenali

Secondo lo studio vegetazionale (vedi figura 3) svolto dalla Saipem in fase di *ante operam* (Saipem S.p.a., 2017) sono presenti 261,3 ha di Pioppeti golenali che costituiscono lo 4,53 % della vegetazione totale presente nel tracciato.

Data la cospicua presenza di intersezioni con il fiume Marecchia sono state individuate otto aree test, con il supporto di dieci aree controllo; l'area interessata al monitoraggio ha una superficie di 10,5 ha che corrisponde al 14,78% della superficie totale osservata. Per la valutazione della media dei valori NDVI sono state utilizzate solamente le aree maggiormente impattate dal metanodotto. Le aree test e controllo dei pioppeti (vedi figura 12 per la localizzazione) hanno mostrato ritmi di ripresa dei valori NDVI differenti dopo la messa a dimora del metanodotto. In alcune aree, il recupero della vegetazione è stato rapido, dove il valore NDVI, è arrivato a 0,799. Al contrario, altre aree hanno evidenziato un recupero significativamente più lento, con valori NDVI di 0,111 a quattro anni dai lavori (vedi figura 21). Questa variabilità nei ritmi di recupero potrebbe essere attribuita a fattori legati al dinamismo del paesaggio fluviale, dove le possibili piene del fiume hanno rallentato il processo evolutivo della vegetazione interessata. Al contrario le aree non alterate dal corso

d'acqua hanno riscontrato un recupero più veloce della biomassa, data la spiccata capacità pioniera della vegetazione ripariale. I valori NDVI osservati e le foto *post operam* (Figura 21) suggeriscono che la copertura vegetale nelle aree impattate dalle lavorazioni abbia raggiunto, al massimo, lo stadio di arbusteto.

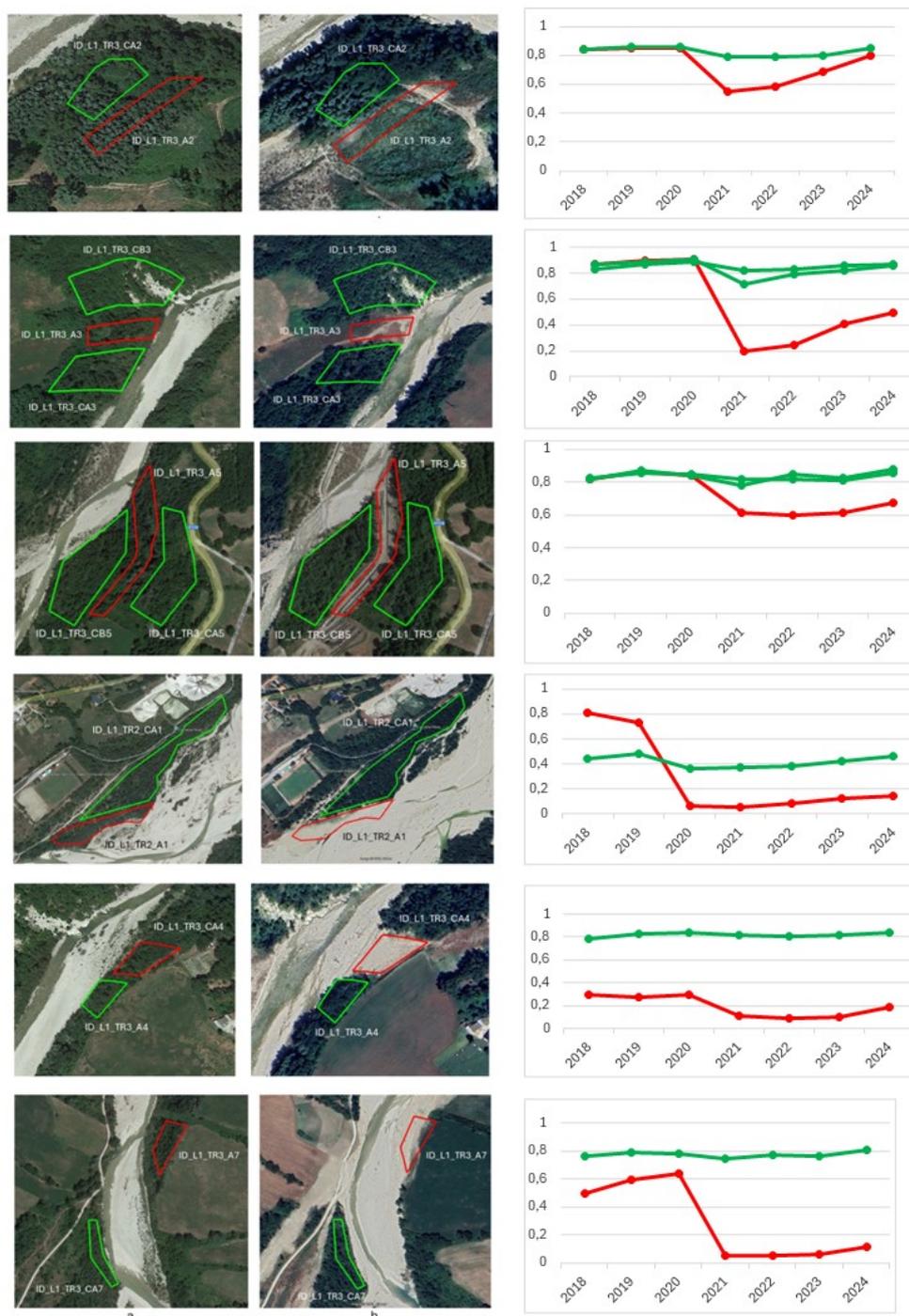


Figura 21 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei pioppeti attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo

In figura 22 è rappresentata nel complesso la categoria dei pioppeti riportando le traiettorie medie sia delle aree controllo che delle aree test. Al momento, secondo la media dei valori delle aree test, il recupero vegetativo è del 36,4% rispetto al valore iniziale; guardando il valore delle aree controllo è stato riscontrato il 35,2%. Il recupero dell'indice vegetativo non è uguale in tutte le aree monitorate. Sono state riscontrate zone leggermente colpite dalle lavorazioni e altre invece profondamente alterate. La capacità pioniera della vegetazione ripariale è sufficiente per poter recuperare la copertura vegetale in maniera autonoma.

Durante il periodo di *post operam* è necessario monitorare la qualità della biomassa vegetale ottenuta affinché venga mantenuta la ricostruzione dell'habitat, è sempre più diffusa (e non positiva) l'invasione di avventizie come robinia e pioppo canadese, a volte di ailanto e negundo, anche aggressive come *Amorpha*, *Phytolacca* e *Sycios angulatus* (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007).

L'habitat 92A0, oltre ad avere una funzione naturalistica, costituisce luoghi di rifugio ed alimentazione per la fauna selvatica, anche come collegamento fra i diversi siti o nuclei boscati ancora presenti nella fascia planiziale (elemento della rete ecologica); spesso, anche in veste di piccolo boschetto o nucleo frammentario di poche piante (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007). La media dell'NDVI dell'aree colpite in 3 anni è passata da 0,240 (2021) a 0,356 (2024), da questi dati si può affermare che il ripristino vegetativo si trova ancora ad una fase iniziale, non è una percentuale sufficiente per definire recuperata l'area di interesse. Per poter ricostituire l'efficienza ecologica saranno importanti i monitoraggi futuri, in particolare nelle aree profondamente colpite dalla messa a dimora della condotta.

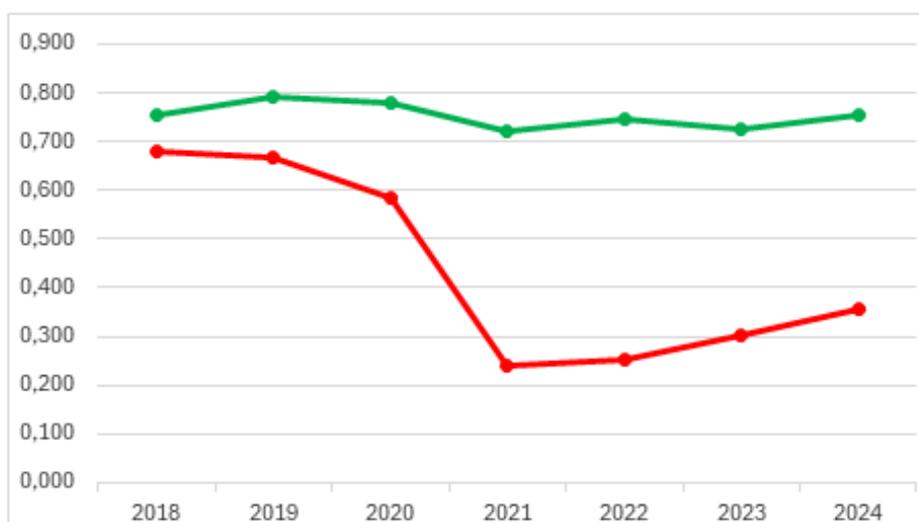


Figura 22 *Variazioni medie dei valori NDVI nei pioppeti attraversati dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.*

2.5 Querceti a roverella neutrobisifili

I querceti a roverella colpiti dal passaggio del metanodotto costituiscono il 3,44% della copertura vegetazionale totale interessata, un'area che equivale a 198,2 ha (vedi figura 3). Per il monitoraggio ambientale sono state individuate 3 aree test e 4 aree controllo., tutte ricadenti nella regione Emilia-Romagna.

Le aree test e di controllo dei querceti (vedi Figura 14 per la localizzazione) hanno mostrato ritmi di ripresa dei valori NDVI differenti dopo i lavori di posa del metanodotto. In alcune aree, il recupero della vegetazione è stato rapido, dove il valore NDVI, è arrivato a 0,661. Al contrario, altre aree hanno evidenziato un recupero significativamente più lento, con valori NDVI di 0,196 a quattro anni dai lavori (vedi Figura 23)

Questa variabilità nei ritmi di recupero potrebbe essere attribuita a fattori topografici. Aree che si trovano in contiguità di grandi boschi favoriscono un buon serbatoio per la disseminazione, permettendo un migliore sviluppo della vegetazione. Al contrario, in aree esposte, come pendii o creste, le condizioni di aridità edafica e la presenza di suoli poveri hanno probabilmente influito negativamente sulla ripresa della vegetazione. Oltre alle cause naturali, è importante considerare l'impatto del manto stradale presente in alcune aree monitorate che potrebbe aver abbassato il valore NDVI.

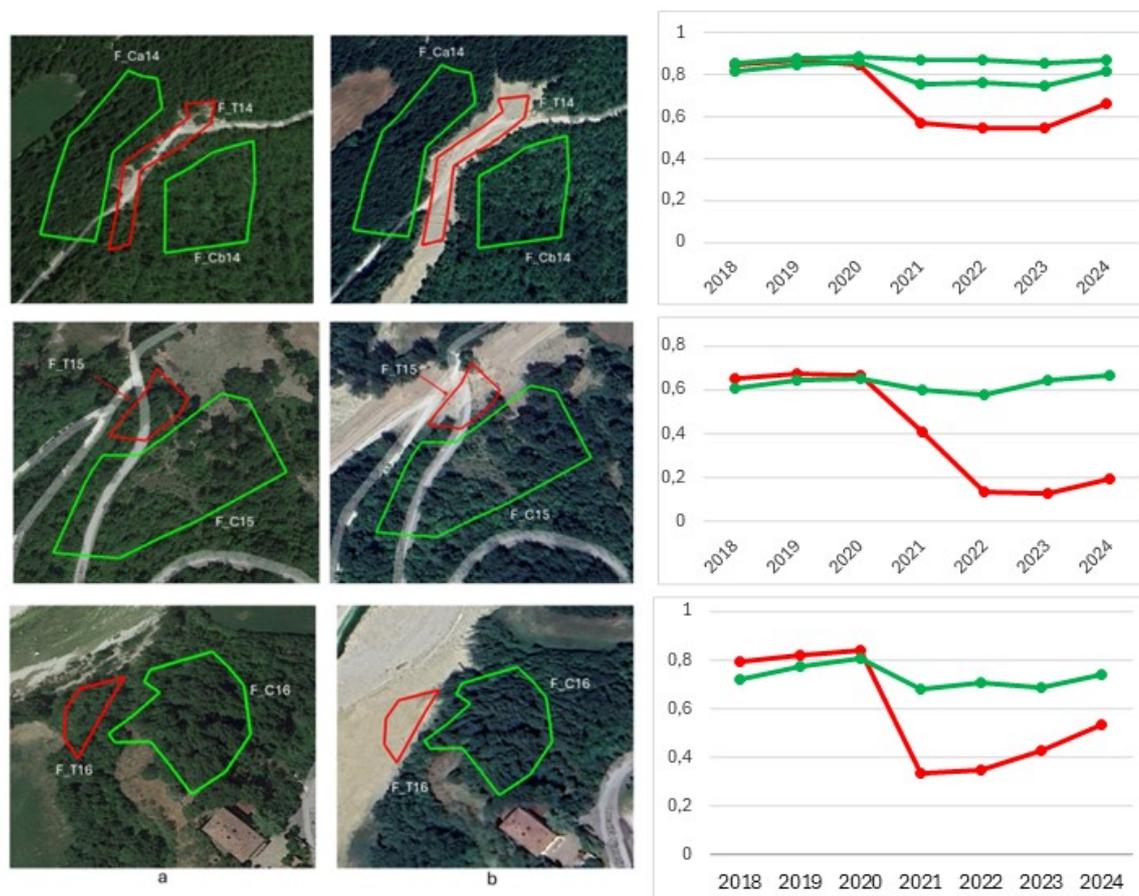


Figura 23 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei querceti a roverella attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo

In figura 24 è rappresentata nel complesso la categoria dei querceti riportando le traiettorie medie sia delle aree controllo che delle aree test

Al momento le aree test hanno recuperato il 29,1% rispetto al valore iniziale e guardando il valore delle aree controllo è stato riscontrato il 34,4%. Il recupero vegetativo è rallentato nelle aree test F_T14 e F_T15 dalla presenza di strade che attraversano parzialmente le superfici monitorate.

Le aree test si collocano all'interno di superfici boscate che rientrano nell'habitat 91AA, le superfici colpite dalle lavorazioni, private dello strato arboreo, sono maggiormente a rischio di invasione da parte di specie esotiche come *Robinia pseudoacacia* e *Ailanthus altissima*,

contro le quali occorre elaborare specifici protocolli di monitoraggio ed eradicazione controllata (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007).

Il punto più basso della curva si registra nel 2022 (vedi figura 24), due anni dopo il posizionamento della condotta, con un valore NDVI di 0,343. Nel 2024, il valore è salito a 0,463, indicando un incremento della biomassa vegetale, probabilmente associabile a uno stadio di arbusteto. Per poter ricostituire l'efficienza ecologica saranno importanti i monitoraggi futuri, in particolare nelle aree profondamente colpite dalla messa a dimora del metanodotto.

Al momento, a distanza di tre anni delle lavorazioni, non si può affermare completato il ripristino ambientale; sarà necessario, pertanto, proseguire il monitoraggio fino al raggiungimento dei valori di 0,7-0,9 che equivalgono a quello di un bosco maturo e privo di interventi antropici (vedi figura 24).

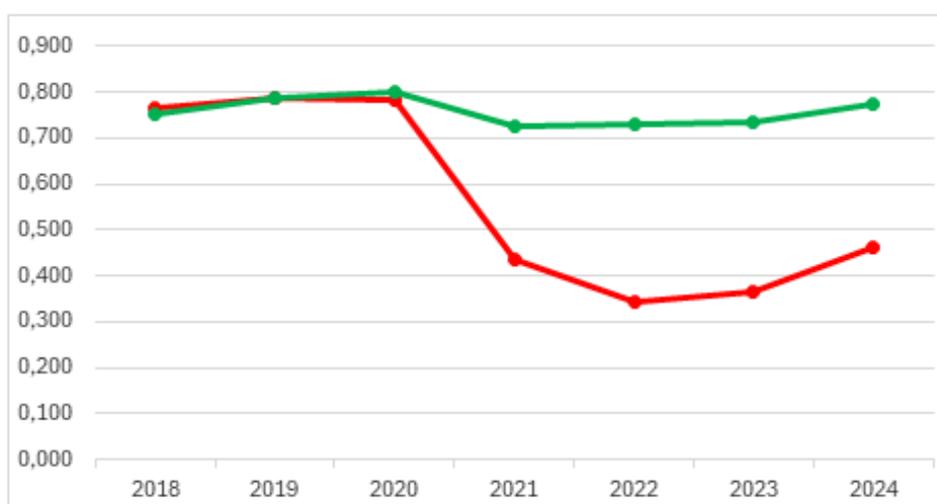


Figura 24 Variazioni medie dei valori NDVI nei querceti a roverella attraversati dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.

2.6 Faggeta eutrofica

Nel tracciato sono presenti in totale 29,9 ha di faggeta che costituiscono lo 0,52 % della vegetazione totale presente nel tracciato (Saipem S.p.a., 2017).

Le aree test (vedi figura 9 per la localizzazione) hanno mostrato ritmi di ripresa dei valori NDVI simili dopo i lavori di posa del metanodotto. La superficie interessata al monitoraggio ha un'estensione di 3,4 ha che corrisponde al 4,77% della superficie totale analizzata.

Tutte le aree test hanno un valore intorno allo 0,4, ciò indica un recupero della copertura vegetale omogeneo. Il valore NDVI osservato e le immagini del 2024 (vedi figura 25) ci indicano che la copertura vegetale nelle aree impattate dalle lavorazioni abbia raggiunto, al massimo, lo stadio di arbusteto o forse ancora erbaceo.

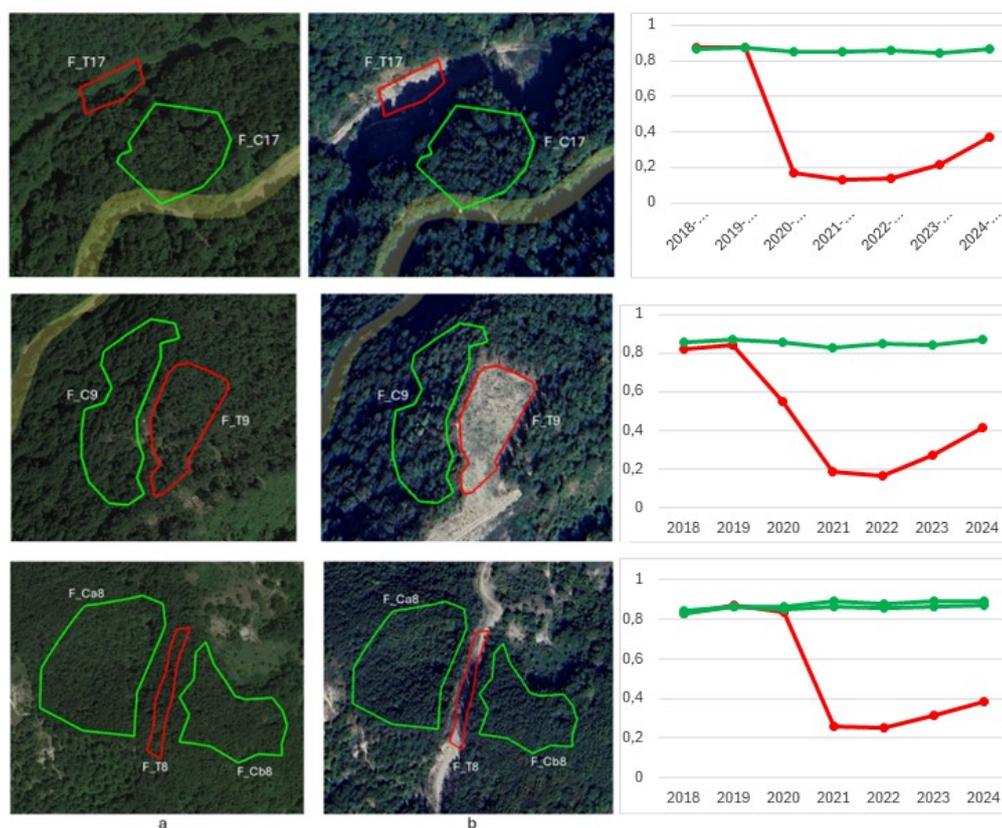


Figura 25 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nelle faggete attraversate dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo

Al momento le aree test hanno recuperato il 29,77% rispetto alla situazione di partenza e guardando il valore delle aree controllo è stato riscontrato un recupero del 29,83%.

Il valore più basso della media delle curve si colloca nel 2022 (vedi figura 26), ovvero due anni dopo la posa della condotta, mentre nel 2024 il dato ha raggiunto 0,390. Ciascuna area test ha un valore NDVI intorno allo 0,4, questo dato ci indica uno stato di ripristino che procede

di pari passo e che nessuna area monitorata ha riscontrato particolari interferenze con la rinaturalizzazione.

Lo stato attuale delle aree test rispetto le curve ottenute è quello di un arbusteto, grazie al telerilevamento sarà possibile monitorare la ricrescita vegetativa fino a che il valore NDVI non raggiungerà quello di una faggeta in salute e priva di interventi antropici che è compreso tra 0,8-0,9 (vedi figura 26)

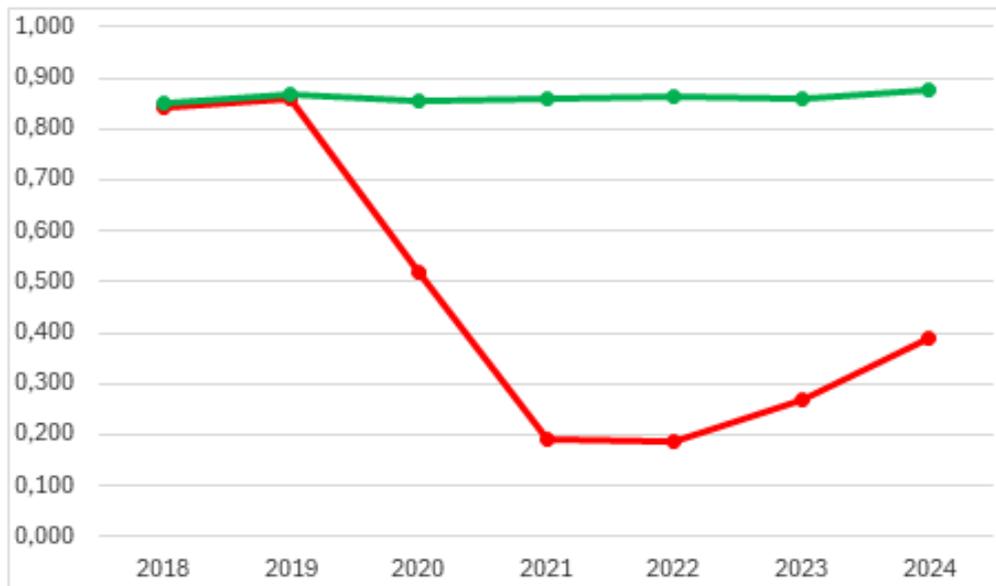


Figura 26 *Variazioni medie dei valori NDVI nelle faggete attraversate dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test.*

2.7 Ostrieti

Secondo lo studio vegetazionale della Saipem svolta in fase di *ante operam* (Saipem S.p.a., 2017) sono presenti 113,6 ha di ostrieti che costituiscono l'1,97 % della vegetazione totale presente nel tracciato. La superficie interessata al monitoraggio ha un'estensione di 5,2 ha che corrisponde al 7,37% della superficie totale analizzata

Le aree test (vedi figura 11 per la localizzazione) hanno avuto ritmi di ripresa dei valori NDVI diversi dopo i lavori di posa del metanodotto. In alcune aree si è evidenziato un recupero generalmente più lento rispetto le altre classi vegetative, dove il valore NDVI, è di 0,175. In altre aree si è evidenziato un recupero più veloce, dove il dato ha raggiunto un valore di 0,493 (vedi figura 27).

La spiegazione della diversa velocità di ripristino potrebbe essere legata al posizionamento topografico delle aree monitorate. In aree dove le condizioni favoriscono una maggiore umidità del suolo, arricchite da precipitazioni e temperature favorevoli, il recupero della copertura vegetale è stato facilitato. Altre aree collocate in posizione di cresta, dove la scarsa ricchezza di acqua e la pendenza non hanno consentito un veloce ripristino vegetativo, è stato evidenziato uno scarso valore NDVI.

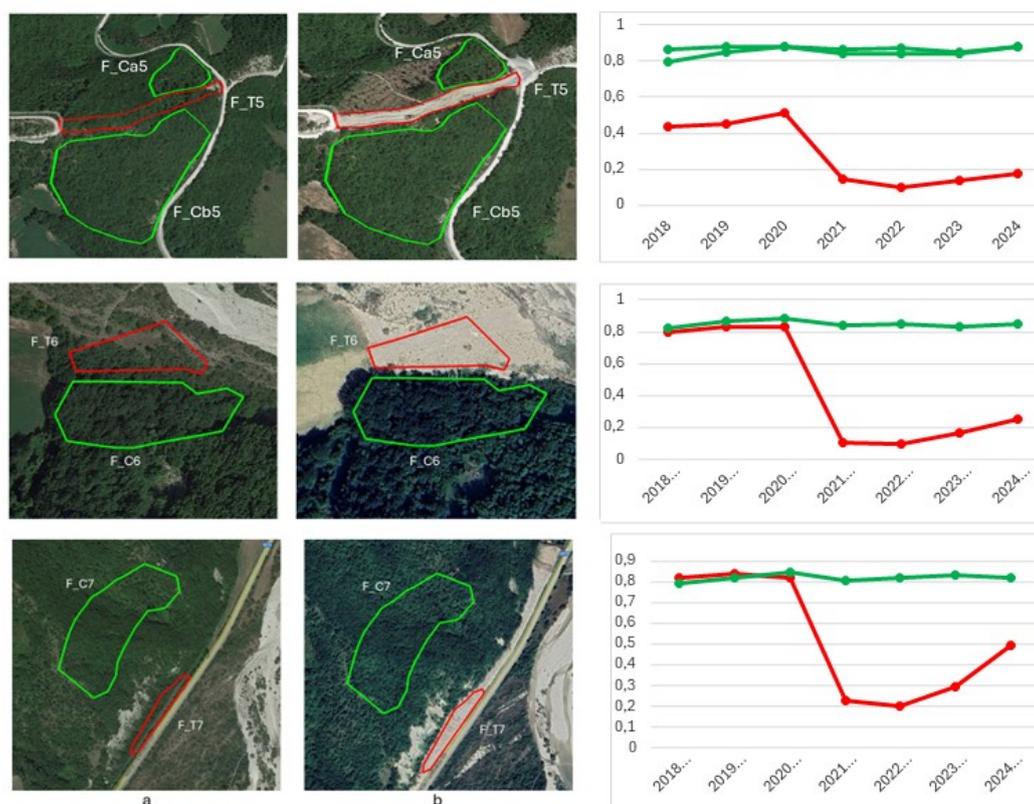


Figura 27 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) negli ostrieti attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo

In figura 28 è rappresentata nel complesso la categoria degli ostrieti riportando le traiettorie medie sia delle aree controllo che delle aree test

Al momento le aree test hanno recuperato il 28,66% rispetto alla situazione di partenza e guardando il valore delle aree controllo è stato riscontrato un recupero del 26%.

Le aree test non hanno recuperato in modo omogeneo, le diverse collocazioni delle aree hanno influenzato la velocità del ripristino vegetativo. I casi presi in evidenza sono quelli delle aree test F_T5 e F_T7.

L'NDVI di F_T5 nel 2024 è di 0,175 che corrisponde ad una situazione di quasi assenza della copertura vegetale. L'area è collocata su un crinale, il posizionamento potrebbe aver causato uno stress idrico alle piantumazioni.

F_T7 presenta un forte aumento negli ultimi 2 anni dell'indice vegetativo, al momento risulta essere di 0,493, l'area test è collocata sul fondo di una valle, al contrario di F_T5 l'apporto idrico delle precipitazioni non viene perso.

Lo stato attuale delle aree test è quello di un arbusteto molto rado, grazie al telerilevamento sarà possibile monitorare la ricrescita vegetativa ed indirizzare gli enti gestori nelle aree dove si stanno verificando rallentamenti con il ripristino della rinaturalizzazione.

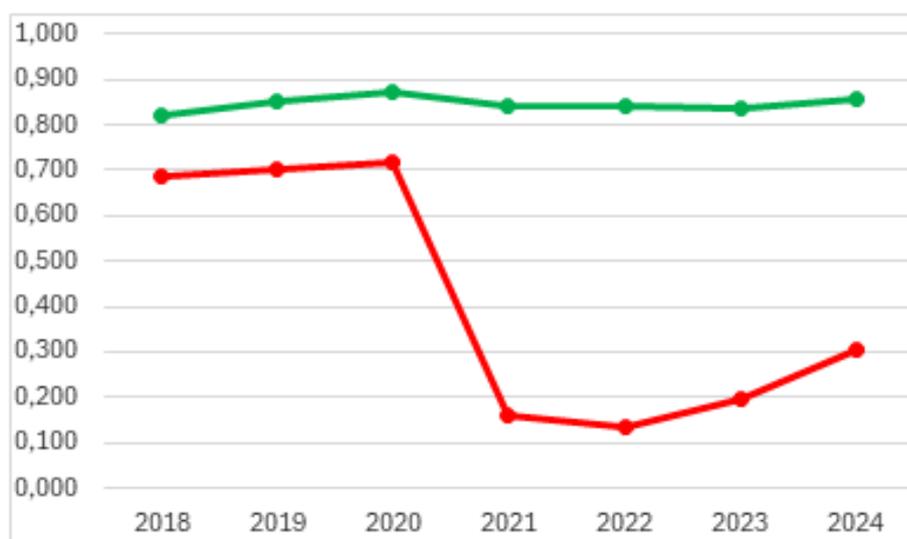


Figura 28 *Variazioni medie dei valori NDVI negli ostrieti attraversate dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test*

2.8 Saliceti arbustivi di greto

Nel tracciato sono presenti 65,5 ha di Saliceti arbustivi di greto che costituiscono l'1,14 % della vegetazione totale presente nel tracciato (Saipem S.p.a., 2017).

Sono state individuate tre aree test (per la localizzazione vedi figura 1), l'area interessata al monitoraggio ha una superficie di 1,5 ha che corrisponde al 2,13% della superficie totale

analizzata. Le aree monitorate hanno mostrato un lento recupero vegetativo, probabilmente lo scarso sviluppo della copertura vegetale è collegato al dinamismo dell'ecosistema fluviale che non permette un regolare accrescimento della vegetazione presente. Al momento il valore dell'indice NDVI di tutte le aree test è inferiore a 0,2, ciò significa che non è possibile ancora parlare di un arbusteto. L'area test ID_L2_TR4_A5 (vedi figura 13 per la localizzazione) è stata presa in considerazione come “caso studio”, dato che si è osservato un netto calo della curva dell'area controllo (vedi figura 30), pertanto non ha preso parte alla valutazione del ripristino vegetativo generale dei Saliceti arbustivi. il motivo potrebbe essere collegato ad una piena del corso d'acqua.

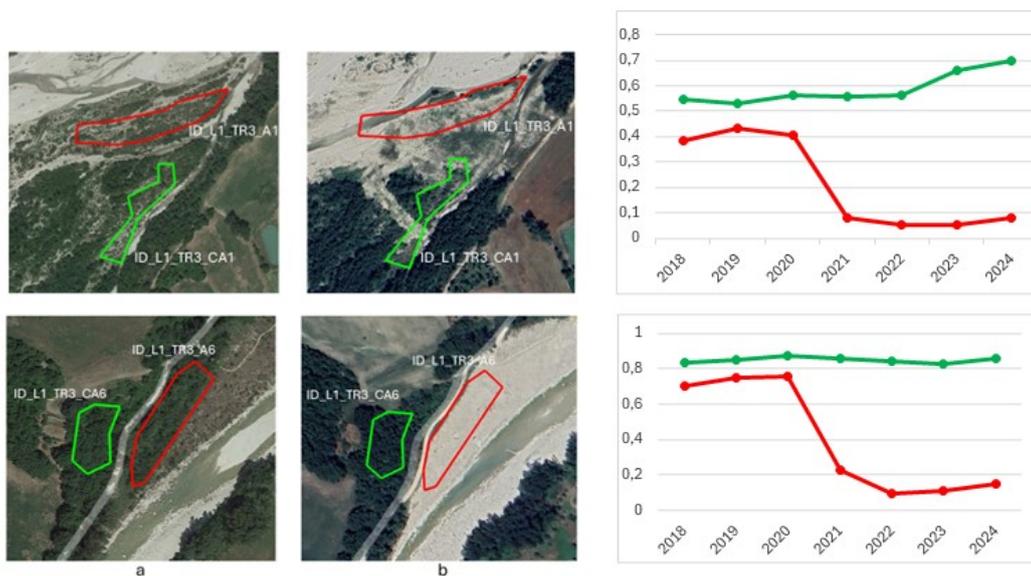


Figura 29 Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde) nei saliceti attraversati dal metanodotto. La prima colonna (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda colonna (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza colonna illustra le variazioni delle medie annuali dell'NDVI nelle aree test e di controllo

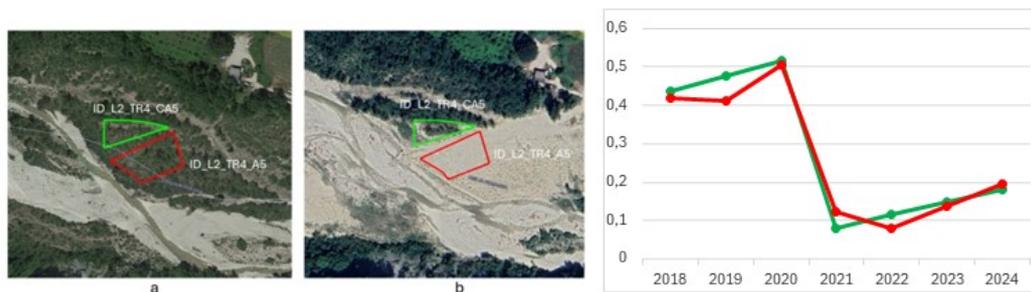


Figura 30 “caso studio” dell’area controllo ID_L2_TR4_CA5. Aree test (in rosso) e aree di controllo (in verde). La prima immagine (a) mostra foto del 2019 ante operam, la seconda immagine (b) foto del 2023 post operam (derivate da Google Earth Pro), mentre la terza illustra la variazione delle medie annuali dell’NDVI nell’ area test e di controllo

Le aree monitorate si trovano nella regione Emilia-Romagna, sono tutte ricadenti nella fascia ripariale del fiume Marecchia.

I saliceti arbustivi rientrano nell’habitat 3240, si tratta di una vegetazione arbustiva pioniera erratica, degli alvei fluviali, costituita da boscaglie a salici arbustivi ed olivello spinoso, talora frequenti lungo i corsi d’acqua appenninici. La copertura di salici e pioppi arborei costituisce in genere meno del 20% (se più del 20% allora ci si riferisce al 92A0). L’habitat comprende formazioni arboreo-arbustive formate da *Salix sp.* e *Hippophae rhamnoides* su greti ciottolosi di fiumi con adeguata alimentazione idrica diretta o di falda superficiale, frequentemente perturbati e ringiovaniti da piene ricorrenti che ne impediscono lo sviluppo verso forme più evolute (Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007).

Al momento le aree test hanno recuperato il 7,90% rispetto alla situazione di partenza e guardando il valore delle aree controllo è stato riscontrato un recupero del 6,30%.

Si tratta della classe vegetativa in cui è stato riscontrato la minor percentuale di recupero della copertura vegetale rispetto le condizioni originarie. Le aree test si trovano tutte nella zona riparia del fiume Marecchia, è facile ricondurre la risposta alla lenta rinaturalizzazione legata ai possibili fenomeni di piena o di esondazione del corso d’acqua. Il caso più evidente si è verificato nell’ area test ID_L2_TR4_A5, dove la corrispettiva area controllo (ID_L2_TR4_CA5) è stata destabilizzata da un probabile ingrossamento del fiume.

La dinamicità di un ecosistema fluviale rende impossibile la formazione di un vero e proprio sottobosco, le modalità e le possibilità evolutive delle cenosi sono strettamente connesse alla dinamica fluviale, caratterizzata da periodiche sommersioni e inghiaiamenti che determinano un continuo ringiovanimento. Viene in questo modo impedita l’evoluzione verso forme più

stabili e mature, il disturbo è inversamente proporzionale alla distanza dall'acqua (Habitat nei Siti Natura 2000, Regione Toscana, 2019) .

Dal monitoraggio svolto con il telerilevamento sono stati riscontrati valori NDVI nel 2024 delle aree test inferiori a 0,2, questo dato va a confermare le caratteristiche descritte in precedenza dell'ecosistema in questione.

Trattandosi di vegetazione prevalentemente erbacea e arbustiva pioniera, non è necessario attuare piani di rinaturalizzazione con piantumazioni. Per poter ricreare la funzionalità ecosistemica dell'habitat originario sarà sufficiente lasciare alla libera evoluzione in quanto dotati di fattori, per quanto erratici, di elevata naturalità (Habitat nei Siti Natura 2000, Regione Toscana, 2019)

Al momento le aree test presentano una copertura vegetale bassa, con il telerilevamento sarà possibile monitorare il ripristino vegetativo nei prossimi anni fino al completo raggiungimento della rinaturalizzazione delle aree colpite.

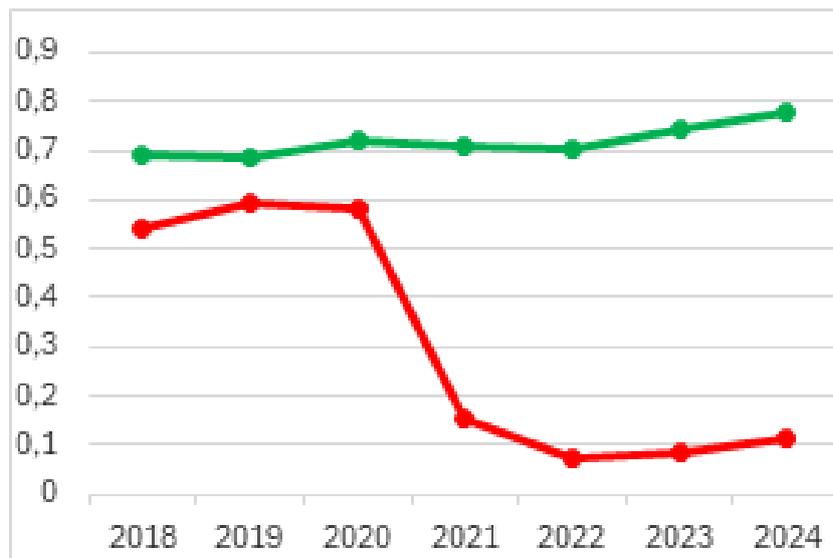


Figura 31 *Variazioni medie dei valori NDVI nei saliceti attraversate dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test*

2.9 Media delle aree test e controllo dell'intero tracciato

Ad oggi, tenendo in considerazione tutte le aree monitorate all'interno del tracciato, si è riscontrato un recupero del valore NDVI equivalente al 33,93% rispetto le condizioni originali in *ante operam*. La classificazione della vegetazione è servita per osservare le variazioni NDVI in relazione alle diverse fitocenosi prese in considerazione per il monitoraggio ambientale. Secondo i dati ottenuti le Cerrete mesofile sono la tipologia vegetativa che ha dimostrato la migliore capacità di rinaturalizzare la superficie alterata, con un recupero medio dell'indice vegetativo del 56,7% rispetto la situazione di partenza. Con la modalità di telerilevamento applicata nella tesi, non è possibile verificare la qualità del recupero; pertanto, sarà dunque necessario indirizzare l'ente gestore ad effettuare sopralluoghi nelle aree interessate ad una maggiore rinaturalizzazione, per controllare la qualità del recupero vegetativo delle cerrete. La classe vegetativa con il minor recupero osservato è quella dei Saliceti arbustivi di greto, al momento la percentuale del ripristino è del 7,9% rispetto alle condizioni originali. Anche se può sembrare un valore basso, è bene ricordare che si tratta di un habitat ripariale, dotato di una spiccata capacità pioniera, ma spesso perturbata da piene ricorrenti che ne impediscono un regolare recupero della copertura vegetale. Sarà importante nei successivi anni monitorare l'andamento delle curve riguardanti le aree d'interesse.

Dai risultati attualmente ottenuti, come era attendibile, la rinaturalizzazione delle superfici impattate dalle lavorazioni è ancora piuttosto lontana dai livelli originali. L'enorme superficie occupata dal metanodotto rende complesso il monitoraggio vegetazionale, grazie all'applicazione del telerilevamento è stato possibile realizzare serie temporali. La velocità e l'accelerazione delle curve sono molto importanti in ecologia, perché possono servire per indirizzare l'ente gestore ad analizzare l'area specifica e valutarne il ripristino.

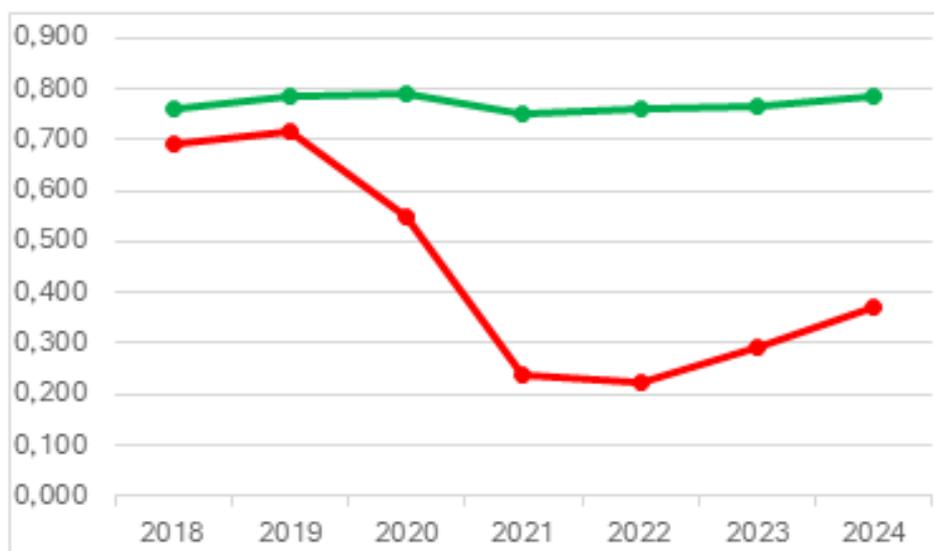


Figura 32 Variazioni medie dei valori NDVI di tutte le aree attraversate dal metanodotto. In verde la traiettoria NDVI media delle aree di controllo, mentre in rosso quella delle aree test

CONCLUSIONI

Il monitoraggio ambientale del tracciato del metanodotto, supportato dal telerilevamento, si è dimostrato una strategia efficace per studiare sia la caratterizzazione della vegetazione in fase *ante operam*, sia la rinaturalizzazione in fase *post operam*, su tutto il tracciato in modo diffuso. Nel nostro caso, l'analisi è stata applicata esclusivamente alle aree test e controllo, ma uno dei principali vantaggi di questa metodologia è la possibilità di estenderla in modo efficiente all'intero tracciato. Questo approccio fornisce preziose indicazioni all'ente gestore sui diversi livelli di recupero delle aree, aiutandolo a ottimizzare risorse, tempo e denaro per pianificare in modo mirato i sopralluoghi di campo.

Le serie temporali NDVI degli ultimi sette anni ci hanno fornito un quadro sul recupero della vegetazione ancora piuttosto basso. L'andamento della curva in futuro ci permetterà di effettuare previsioni sui tempi di ripristino completo sulle aree impattate dalle lavorazioni. La durata del monitoraggio ambientale è uno degli obiettivi della tesi, in quanto ci permette di capire quanti anni sono necessari per poter ristabilire i valori NDVI originali. Con questa metodologia qualsiasi variazione della curva può essere interpretata e quantificata; cambiamenti repentini indicano disturbi violenti come incendi o lavorazioni per grandi opere, ad esempio la creazione di una pista per un metanodotto. Graduali variazioni che si manifestano in più anni possono indicare cambiamenti non percettibili all'occhio umano, in questo caso la rinaturalizzazione delle vaste superfici monitorate.

La classificazione della vegetazione ha permesso di studiare il comportamento delle varie tipologie vegetazionali prese in considerazione in risposta al taglio. Non tutte le aree hanno recuperato in maniera omogenea, questa metodologia è utile per curare e valutare il ripristino in quei luoghi dove si vede un recupero della vegetazione molto lento. È importante anche analizzare le aree test che hanno recuperato più velocemente perché si può indirizzare l'ente gestore al controllo della qualità del recupero. È opportuno precisare che l'analisi svolta al telerilevamento indica la prima parte del monitoraggio, dovranno essere svolte successivamente analisi più approfondite per concludere l'indagine sul campo. E' possibile anche l'utilizzo di strumentazioni con una maggiore risoluzione (ad esempio droni) per valutare la qualità della rinaturalizzazione e capire se gli habitat alterati abbiano recuperato la

loro funzionalità ecosistemica. È bene considerare l'NDVI uno strumento di supporto, in quanto ci permette di osservare lo stato di copertura vegetazionale delle aree monitorate.

Il principale vantaggio offerto da questa modalità di monitoraggio è la velocità con cui si può verificare lo stato di recupero senza dover fare periodici sopralluoghi sulle aree di interesse, permettendo così un notevole risparmio a livello economico ma anche di tempo.

Come evidenziato nella tesi di Giammarco Cecchini (Cecchini, 2021), il pool delle comunità vegetali è stato ampliato passando da 15 aree test, costituito da quattro tipologie vegetali, a 29 aree test formato da sette comunità vegetali. Il monitoraggio è stato eseguito seguendo la classificazione vegetazionale, l'ampliamento del pool è servito per monitorare le diverse risposte del recupero vegetativo in base alla suddivisione delle cenosi individuate. Secondo i dati ottenuti, a distanza di quattro anni, nelle aree test monitorate si è riscontrato un recupero medio del 33,93% rispetto al valore di partenza e il dato medio ottenuto dell'indice di vegetazione pari a 0,396 che corrisponde ad una copertura della vegetazione molto bassa con vigoria alta (Antognelli, 2018). Questi dati confermano momentaneamente un incompleto recupero del ripristino vegetativo.

Lo scopo della tesi è quello di dimostrare che grazie al telerilevamento è possibile effettuare un monitoraggio ambientale, anche per superfici molto vaste, per tutto il periodo necessario al completo recupero della copertura vegetazionale. Il telerilevamento è una disciplina in continua evoluzione, grazie alle costanti innovazioni che riguardano l'osservazione della terra e ai relativi sistemi di elaborazione dei dati. L'utilizzo del telerilevamento può essere applicato in più contesti territoriali, in particolar modo per lo studio del dinamismo vegetativo alterato da fattori antropici o naturali.

BIBLIOGRAFIA

- Agenzia Spaziale Italiana, 2024. *Agenzia Spaziale Italiana*. [Online]
Available at: <https://www.asi.it/2024/09/sentinel-2c-ha-spiccato-il-volo/#:~:text=Il%20satellite%2C%20dopo%20il%20rinvio,verso%20le%204%3A48%20italiane>.
[Consultato il giorno 11 Novembre 2024].
- Antognelli, S., 2018. *Agricolus*. [Online]
Available at: <https://www.agricolus.com/indici-vegetazione-ndvi-ndmi-istruzioni-luso/>
[Consultato il giorno 12 Novembre 2024].
- ARPAE, 2024. *ARPAE*. [Online]
[Consultato il giorno 2 Novembre 2024].
- Bianchi, G., Verdi, G. & Rossi, M., 2018. Titolo dell'articolo. *Journal Name*, 48(3), pp. 11-15.
- Campbell, J., 1996. *introduction to remote sensing*. V a cura di New York: Guilford.
- Cecchini, G., 2021. *LE ANALISI FUNZIONALI ED IL TELERILEVAMENTO PER IL MONITORAGGIO DEL PROCESSO DI RINATURALIZZAZIONE DELLA VEGETAZIONE NEI TRACCIATI DEI METANODOTTI*. Ancona: UNIVPM.
- Di Fonzo, T. & L. F., 2005. *Serie storiche economiche*. [Online]
Available at: https://it.wikipedia.org/wiki/Serie_storica
[Consultato il giorno 2 novembre 2024].
- Direzione Generale Ambiente, Emilia-Romagna, 2007. *FederGEV Emilia-Romagna*. [Online]
Available at: <https://www.federgev-emiliaromagna.it/files/Manuale-Habitat-RER.pdf>
[Consultato il giorno 6 Novembre 2024].
- Ecoage, s.d. *Ecoage.it*. [Online]
Available at: https://www.ecoage.it/storia_del_gas_naturale.htm
[Consultato il giorno 10 Novembre 2024].

- Energetica, M. d. e. d. S., 2019. *Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica*. [Online]
 Available at: <https://va.mite.gov.it/File/Documento/338603>
 [Consultato il giorno 12 Novembre 2024].
- Foggi, B., 2017. *5130 formazioni a juniperus communis su lande o prati calcicoli*. [Online]
 Available at:
http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/hotlinks/aree_protette/habitat/schede_pdf/5130.pdf
 [Consultato il giorno 29 Ottobre 2024].
- Galli, A., 2022. *Modulo telerilevamento*. Ancona: UNIVPM.
- Gomasasca, M. A., 2012. *Introduzione a telerilevamento e GIS per la Gestione delle Risorse Agricole e Ambientali*. s.l.:s.n.
- Google, 2024. *Google Earth Pro*. [Online]
 Available at: <https://www.google.it/earth/>
 [Consultato il giorno 5 Novembre 2024].
- Habitat nei Siti Natura 2000, Regione Toscana, 2019. *Regione Toscana*. [Online]
 Available at:
http://www502.regione.toscana.it/searcherlite/habitat_dettaglio_tipo_veg.jsp?valore=TV019
 [Consultato il giorno 6 Novembre 2024].
- ISPRA, 2010. *Analisi e progettazione botanica per gli interventi di mitigazione degli impatti delle infrastrutture lineari*, Roma: Michelina Porcarelli.
- LILLESAND T.M., K. R., 1999. *Remote sensing and image interpretation*. 1 a cura di New York: John Wiley & Sons.
- Microgeo, 2024. *GeoStore*. [Online]
 Available at: <https://www.microgeo.it/iperspettrale-multispettrale/>
 [Consultato il giorno 11 Novembre 2024].
- Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica, 2024. *Rete Natura 2000*. [Online]
 Available at: <https://www.mase.gov.it/>
 [Consultato il giorno 2 novembre 2024].

Perego, A., 2015. *Telerilevamento e onde elettromagnetiche*. [Online]
Available at: <https://www.alspergis.altervista.org/lezione/04.html>
[Consultato il giorno 9 Novembre 2024].

Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017.
Google Earth Engine. [Online]
Available at: <https://earthengine.google.com/>
[Consultato il giorno 1 Novembre 2024].

QGIS, 2016. *QGIS Web Site*. [Online]
Available at: <https://www.qgis.org/>
[Consultato il giorno 1 Novembre 2024].

Rossi, M., Bianchi, G. & Verdi, G., 2018. Titolo dell'articolo. *Journal Name*, pp. 10-15.

S.p.a, S., 2017. *Rifacimento Metanodotto Rimini - Sansepolcro DN 650/750 (26"/30"), DP 75 bar ed opere connesse*. *Studio di Impatto Ambientale*, s.l.: Snam Rete e Gas.

Saipem S.p.a., 2017. *Rifacimento metanodotto Rimini - Sansepolcro DN 650/750 (26"/30"), DP 75 bar ed opere connesse*, s.l.: SNAM Rete e gas.

Snam S.p.A, 2024. *Snam S.p.A*. [Online]
Available at: <https://www.snam.it/it/home.html>
[Consultato il giorno 1 Novembre 2024].

Verdi, G., 2017. Titolo del capitolo. In: R. Cristiano, a cura di *Titolo del libro*. Ancona: CasaEditrice, pp. 10-20.