



POLITECNICO DI TORINO

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL
TERRITORIO**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**ANALISI MULTITEMPORALE SULLA DIFFUSIONE DEL
BATTERIO 'XYLELLA FASTIDIOSA' NELL'AREA DEL
SALENTO**

Relatore:

Prof. Ing. Piero Boccardo

Correlatrice:

Prof. Ing. Eufemia Tarantino

Candidato:

Luigi Pesce

matricola n. 298396

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

Abstract.....	3
1. Panoramica generale sul batterio Xylella.....	5
1.1 Caratteristiche del patogeno	5
1.2 Sintomatologia.....	8
1.3 Il vettore biologico.....	11
2. Ricostruzione del contagio.....	13
3. Conseguenze dell'epidemia sulla regione.....	24
3.1 Interventi di riqualificazione dei terreni colpiti da Xylella	28
4. Il ruolo del telerilevamento	32
4.1 Lo spettro elettromagnetico.....	33
4.2 Firme spettrali	35
4.3 Indici di Vegetazione.....	39
5. Analisi della letteratura	48
6. Utilizzo di dati multispettrali per monitorare il fenomeno Xylella.....	52
6.1 Individuazione delle aree di interesse.....	54
6.2 Caratteristiche dei datasets	61
6.3 Metodologie impiegate in fase di analisi.....	63
7. Analisi dei risultati	68
AOI 1.....	68
AOI 2.....	77
AOI 3.....	84
8. Conclusioni	89
9. Bibliografia	92

Abstract

La Regione Puglia è riconosciuta principalmente come terra di olivi secolari (il 79% della superficie a uliveto, ovvero 299.215 ettari, con alberi con più di 50 anni), in quanto prima regione italiana per superficie con alberi di ulivo (il 34%, ovvero 377.500 ha) e per la produzione dell'olio d'oliva (36%, ossia 11.332.400 quintali) (www.istat.it, 2012). Negli ultimi anni è stata interessata dal fenomeno del “complesso del disseccamento rapido dell'olivo” (CoDiRO) in specifiche aree nella zona del Salento, ove è stata riscontrata la presenza del batterio da quarantena “Xylella fastidiosa” (Xf). A partire dal 2013 il Governo regionale ha adottato delle contromisure per contrastare la diffusione del batterio, mediante un uso massiccio di pesticidi, l'abbattimento di alberi (effetti e non) e il divieto di ripiantare piante “ospiti” di Xf, con effetti gravi ed irreversibili sul paesaggio, l'ecosistema e l'economia locale. In tempi recenti si è assistito ad un aumento di studi scientifici basati sull'uso di tecniche geomatiche a supporto dell'agricoltura di precisione. Tale sviluppo, favorito dalla maggiore disponibilità di strumenti di rilevazione da remoto e di prossimità, ha condotto ad un significativo avanzamento della possibilità di monitorare fenomeni biologici complessi e di gestire, in ambiente GIS, i relativi dati sia in modalità stand-alone che in rete. Pertanto, è possibile integrare dati spaziali derivanti da metodi diretti (azioni di monitoraggio sugli stadi di sviluppo, sullo stato sanitario delle colture ecc) e indiretti (elaborazione di dati telerilevati) per creare modelli previsionali per la difesa del territorio, e sviluppare strategie di intervento per la difesa delle colture.

Lo scopo di questo lavoro è condurre un'analisi di change detection sugli impatti della diffusione del batterio Xf sul territorio regionale, comparando l'uso del suolo in due scenari distinti, pre e post evento. L'analisi si basa sulla variazione temporale di Indici Vegetativi (IV), calcolati su immagini multispettrali acquisite da diverse tipologie di satellite, come principale indicatore dello stato di salute delle piante monitorate.

Abstract (English version)

The Puglia Region is mainly recognized as the land of ancient olive trees, with 79% of its land dedicated to olive groves, totaling 299,215 hectares, featuring trees over 50 years old. It is the leading Italian region in terms of olive tree area, accounting for 34% of the total (377,500 hectares), and olive oil production, contributing to 36% (11,332,400 quintals) of the national output (source: www.istat.it, 2012). In recent years, specific areas in the Salento region have been affected by the phenomenon of the 'Rapid Olive Decline Complex' (CoDiRO), where the quarantine bacterium 'Xylella fastidiosa' (Xf) has been detected. Since 2013, the regional government has implemented countermeasures to delay the spread of the bacterium, including the extensive use of pesticides, the removal of trees (both affected and unaffected), and the prohibition of replanting 'host' plants of Xf. These measures have had severe and irreversible effects on the landscape, ecosystem, and local economy. In recent times, there has been an increase in scientific studies utilizing Geomatics techniques to support precision agriculture. This improvement, facilitated by the greater availability of remote and proximity sensing tools, has significantly advanced the capability to monitor complex biological phenomena and manage related data in both stand-alone and networked GIS environments. Consequently, it is possible to integrate spatial data from direct methods (monitoring activities on developmental stages, crop health status, etc.) and indirect methods (remote sensing data processing) to create predictive models for territorial defense and develop intervention strategies for crop protection.

The purpose of this study is to conduct a change detection analysis on the impacts of Xf bacterium spread on the regional territory by comparing land use in two distinct scenarios: pre and post-event. The analysis is based on the temporal variation of Vegetation Indices (VI), calculated from multispectral images acquired from various satellite sources, serving as the primary indicator of the monitored plant's health.

1. Panoramica generale sul batterio Xylella

1.1 Caratteristiche del patogeno

La *Xylella fastidiosa* (Saponari et al., 2017) è un batterio non sporigeno che si insinua e colonizza i vasi xilematici di alcune piante, i quali svolgono funzione di trasportare la linfa grezza, composta da acqua e sali minerali, all'interno delle piante stesse. Il termine “fastidiosa” attribuito a questo microorganismo riflette il suo comportamento biologico, in quanto appartiene alla categoria dei “microorganismi fastidiosi”, ossia organismi che richiedono condizioni specifiche e nutrienti particolari per la loro riproduzione in laboratorio. Questa particolarità rende l'isolamento e la coltura in vitro di questo batterio un compito estremamente arduo e lungo. La complessità nel suo studio ha contribuito alla difficoltà nel dimostrare la sua responsabilità nella morte delle piante. Inizialmente, la *Xylella fastidiosa* è stata classificata come virus, e questa errata interpretazione è perdurata per oltre un secolo, fino al 1987, anno in cui si riuscì a isolarla da piante di arancio. Le cellule di *Xylella fastidiosa*, riportate in Figura 1.1, hanno una forma bastoncellare e dimensioni di circa 1-2 micron (millesimi di millimetro), e sono prive di flagelli, ossia le appendici cellulari funzionali al movimento di alcuni batteri.

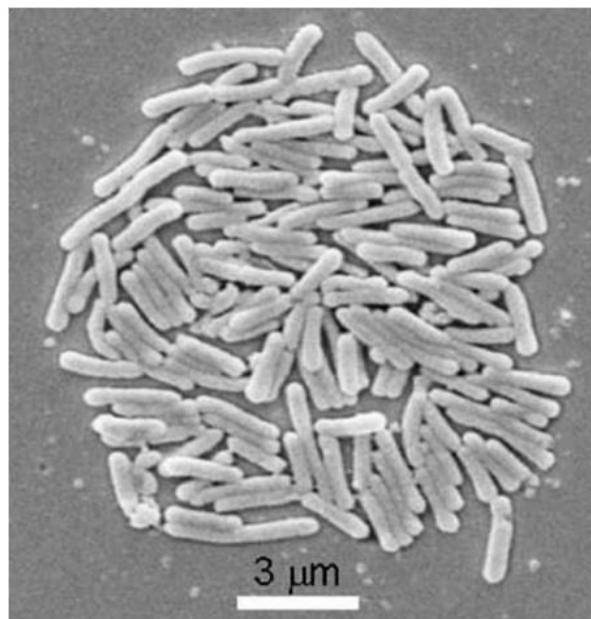


Figura 1.1: Struttura delle cellule del batterio '*Xylella fastidiosa*' (FONTE: <https://www.fv-bergerac.fr/2020/09/08/xylella-fastidiosa-nouveau-fleau/xylella-fastidiosa-the-causal-agent-of-pierces-and-other-diseases-credits-dr/>)

Il processo di riproduzione della *Xylella fastidiosa* (De Filippis, R., 2019) avviene tramite la secrezione, da parte del batterio stesso, di un biofilm contenente grumi che occludono i vasi legnosi della pianta ospite, interrompendo il flusso della linfa grezza e impedendo il fisiologico rifornimento idrico. L'azione patogena del batterio viene accentuata da alcune proteine contenute nella matrice mucosa, e il sintomo che ne deriva è uno stress idrico della pianta, con conseguente disseccamento che si manifesta in maniera differente a seconda della specie vegetale.

Ciò che rende la *Xylella fastidiosa* particolarmente pericolosa è la sua capacità di infettare più di 350 specie vegetali appartenenti a 75 famiglie botaniche diverse. Una volta stabilitasi in un nuovo ambiente, è estremamente difficile eradicarla completamente o contenerne efficacemente la diffusione.

Il luogo di origine del batterio è l'America Centrale, ma già nel secolo scorso esso si era diffuso in tutta la zona occidentale del continente americano, dal Canada all'Argentina. Fino al 2013, anno in cui è stata ritrovata in Puglia, la presenza di *Xylella fastidiosa* non era stata mai stata accertata in Europa. Dopo il suo ritrovamento in Salento, e presumibilmente dopo l'intensificarsi dei controlli doganali su piante importate, specialmente quelle ornamentali, altri casi di *Xylella* di sottospecie diverse si sono registrati in Italia (in Toscana) e in altri paesi europei come la Francia (in Corsica e in Provenza). È ormai un'opinione riconosciuta che la diffusione di *Xylella* in Europa sia principalmente dovuta al fenomeno della globalizzazione e al commercio nel settore vivaistico di piante ornamentali che spesso dal Centro America arrivano nei grandi porti europei.

Nello specifico, il ceppo di *Xylella* ritrovato in Salento ("pauca CoDiRO") è lo stesso di quello presente in Costa Rica. Il suo ingresso in Europa è stato attribuito a un carico di piantine di caffè infette approdate nel porto di Rotterdam e destinate al commercio vivaistico. Alcune delle specie vegetali ospiti di *X. f.* in Salento sono, oltre all'olivo, mandorlo, ciliegio dolce, oleandro, ginestra, mirto, mirtifoglio, rosmarino, westringa (simile al rosmarino) e acacia.

La vasta gamma di piante che possono ospitare *Xylella*, insieme alla sua capacità di ibridarsi e creare nuove sottospecie batterica attraverso la ricombinazione genetica, costituisce una seria minaccia per gli ecosistemi che attualmente non

rientrano ancora tra le tipologie di habitat dove il batterio può proliferare. Tra le piante infettate da *Xylella*, si contano numerose specie ornamentali, forestali e frutticole, tra cui la vite. Questo scenario suscita legittime preoccupazioni per il futuro, poiché la diffusione di nuovi ceppi o sottospecie potrebbe avere gravi conseguenze sulla produzione non solo di olio d'oliva, ma anche di vino, che rappresenta una fonte di reddito molto grande in Italia.

1.2 Sintomatologia

Il principale sintomo derivante dal contagio da *Xylella* (Saponari et al., 2013, De Filippis, R., 2019) è chiamato CoDiRo (“Complesso di Disseccamento Rapido dell’Olivo”), noto anche con l’acronimo OQDS (“Olive Quick Decline Syndrome”). Questa patologia si presenta inizialmente attraverso la distintiva manifestazione di una necrosi improvvisa nell'apice delle foglie, per poi evolversi nel corso di un periodo di 2-3 anni, diffondendosi gradualmente nell'intera chioma dell'albero e causando la morte della pianta nella maggior parte dei casi. I sintomi visibili di questa patologia sono illustrati in Figura 1.2 e in Figura 1.3.



Figura 1.2: Disseccamento delle foglie di un albero di ulivo situato a Gallipoli, in Salento, avvenuto ad ottobre 2013 (FONTE: Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante)



Figura 1.3: Disseccamento diffuso delle chiome di alberi di ulivo situati a Gallipoli, in Salento, avvenuto ad ottobre 2013 (FONTE: Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante)

Il processo patogeno ha la particolarità di essere molto versatile, infettando ulivi di ogni età e varietà. Di particolare interesse sono le varietà "Ogliarola salentina" e "Cellina di Nardò," le quali rappresentano quasi l'intera coltura monovarietale di ulivi presenti nella regione del Salento. Queste varietà si rivelano essere particolarmente suscettibili all'OQDS e manifestano i sintomi della malattia in una forma molto acuta. Tale fenomeno presenta implicazioni significative per la coltivazione di ulivi in questa regione, richiedendo un'attenta considerazione e strategie preventive di gestione. La conseguenza su scala regionale riguarda la produzione di olio, la quale è stata gravemente compromessa; nel gennaio del 2019, la Coldiretti ha calcolato che i danni economici derivanti da tale epidemia, a partire dalla sua identificazione nell'ottobre del 2013, abbiano raggiunto una cifra spaventosa di 1,2 miliardi di euro (Redazione, Coldiretti.it, 19 gennaio 2019). Le Figure 1.4, 1.5 confrontano due scenari, pre e post-evento, di un oliveto situato a Gallipoli (LE), evidenziando l'impatto visivo che questo fenomeno comporta a larga scala, corrispondente al danno paesaggistico causato dal patogeno.



Figura 1.4: Foto di un oliveto di Gallipoli, scattata ad ottobre 2013 (FONTE: infoxylella.it, 29 marzo 2016)



Figura 1.5: Foto di un oliveto di Gallipoli, scattata ad marzo 2016 (FONTE: infoxylella.it, 29 marzo 2016)

1.3 Il vettore biologico

La diffusione della malattia (*Xylella*, Misure di contenimento e prevenzione, aprile 2021) è attribuita agli insetti xilemofili, i quali si alimentano della linfa contenuta nello xilema, dove si annida il patogeno. Quando uno di questi insetti punge una pianta già infetta per prelevare la sua linfa, ospita il patogeno fino al momento in cui entra in contatto con una nuova pianta, inoculando così il pericoloso batterio. L'efficacia di questa trasmissione è strettamente legata al tipo di insetto vettore coinvolto e alla specifica specie di pianta infetta di cui si nutre l'insetto. La maggior parte degli insetti vettori appartiene alla famiglia delle Cicadellidae, comunemente chiamate "cicaline". Sono state identificate almeno 38 specie di cicaline capaci di trasmettere la *Xylella fastidiosa*, ma fortunatamente nel territorio salentino una sola di queste è presente, la "Sputacchina media," nota anche come *Philaeus spumarius*. Questo piccolo insetto, oltre a essere noto per essere il vettore della temuta Malattia di Pierce nella regione viticola della California, è una presenza comune nelle campagne del Salento e ha uno stretto rapporto con l'olivo. Il nome "sputacchina" deriva dalla caratteristica schiuma che circonda e protegge l'insetto durante le prime fasi della sua vita. Le ninfe della sputacchina non acquisiscono immediatamente il batterio poiché si nutrono di piante erbacee che non rappresentano un ospite per *Xylella*. Solo quando raggiunge l'età adulta, l'insetto è in grado di acquisire il batterio nutrendosi di piante ospiti di *Xylella*, come l'olivo e la vite. Dalla primavera alla tarda estate, è possibile osservare su ogni albero di olivo un numero significativo di sputacchine, che può raggiungere diverse centinaia. Questo significa che la diffusione della malattia è estremamente efficiente, poiché ogni sputacchina infettata ha il potenziale per contagiare tutte le piante sane suscettibili a *Xylella* con cui entra in contatto. Si stima che la sputacchina possa spostarsi per circa 100 metri, ma in realtà l'infezione può essere diffusa su distanze molto maggiori, in quanto l'insetto può attaccarsi a persone, veicoli e animali selvatici, viaggiando così per diversi chilometri. Questo rende praticamente impossibile l'adozione di una strategia di contenimento totale dell'infezione. Inoltre, le sputacchine prediligono le piante che sono in buona salute e hanno un aspetto verde e vigoroso. La Figura 1.6 illustra la dinamica di trasmissione del batterio e il ciclo di vita del vettore biologico.

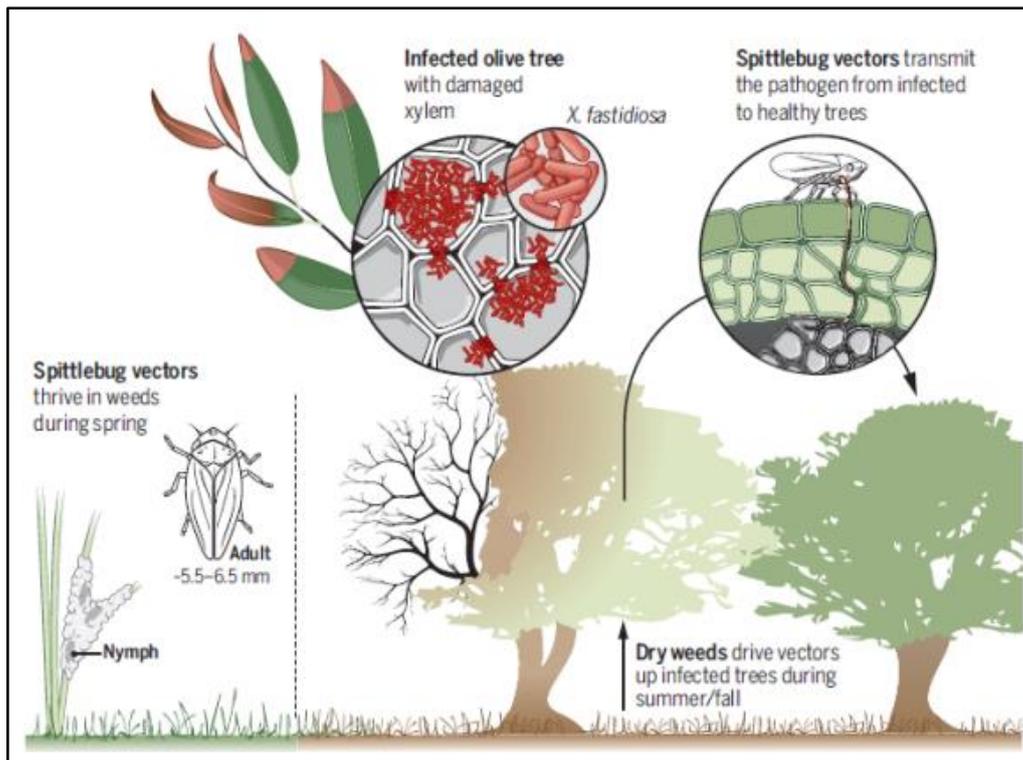


Figura 1.6: Trasmissione del patogeno *Xylella* tramite l'insetto Sputacchina (FONTE: R. Almeida, "Can Apulia's olive trees be saved?", *Science*, 22 luglio 2016)

2. Ricostruzione del contagio

I primi avvenimenti riguardanti tale vicenda (De Filippis, R., 2019) risalgono ad agosto del 2013, quando Donato Boscia, a capo dell'Istituto per la Protezione Sostenibile delle Piante (IPSP) del Cnr di Bari, si trovava nella provincia meridionale di Lecce, precisamente a Taviano, un piccolo paese a pochi chilometri a sud di Gallipoli, presso i suoi suoceri. Il suocero, un uomo ottantaquattrenne, era preoccupato perché gli olivi nel suo terreno stavano morendo misteriosamente da alcuni mesi, e la situazione non accennò a migliorare nonostante le copiose potature.

Dopo un rapido esame nell'oliveto vicino alla casa dei suoceri, Boscia notò che gli ulivi mostravano sintomi insoliti: foglie bruciacchiate, chiome scure e olive appassite sugli alberi. Questi sintomi somigliavano notevolmente a quelli causati dalla Malattia di Pierce che aveva devastato la coltivazione della vite in California, un'area in cui il professor Giovanni Paolo Martelli, un eminente patologo vegetale ed esperto di *Xylella fastidiosa*, aveva trascorso parte della sua carriera accademica. Il professor Martelli fu per tale motivo interpellato da Boscia per suggerire delle metodiche per curare gli olivi infetti; fu consigliato a Boscia di condurre analisi specifiche per ricercare il patogeno *Xylella fastidiosa*, i cui esiti risultarono sconvolgenti: tutti i campioni erano positivi alla presenza del DNA di *Xylella fastidiosa*, un batterio ritenuto confinato al continente americano.

La scoperta appena fatta fu un evento grave in Italia, e nell'ottobre del 2013, il Servizio Fitosanitario Regionale, il Servizio Fitosanitario Nazionale e la Commissione Europea furono prontamente informati. Il Consiglio Regionale della Puglia varò un piano di emergenza che comprendeva la rimozione delle piante infette nelle aree colpite, l'uso di insetticidi per controllare gli insetti vettori e monitoraggi continui nelle zone circostanti i focolai di infezione, seguendo le linee guida europee per la gestione di patogeni in quarantena. Il piano implica anche indagini scientifiche approfondite per catalogare tutte le specie vegetali ospiti di *Xylella* presenti nella regione del Salento. Il fine principale riguarda l'identificazione del ceppo batterico e le sue origini, una stima della pericolosità e dell'aggressività del batterio (cioè, la sua capacità di

causare malattie), oltre a monitorare gli insetti vettori e sottoporli a prove di trasmissione sperimentale per verificare che siano effettivamente le sputacchine i vettori della batteriosi. La rapidità con cui viene stilato il piano viene giustificata dal fatto che la diffusione del CoDiRO può compromettere lo sviluppo economico delle imprese agricole del Salento, dove l'olivicoltura è molto importante. Il monitoraggio capillare previsto dal piano nelle province interessate dall'emergenza fitosanitaria ha come fine anche la definizione delle seguenti zone (Bassi, R. et al., 2016):

- *zona focolaio*: area dove è stata accertata ufficialmente la presenza del patogeno e si può ritenere tecnicamente possibile la sua eradicazione;
- *zona di insediamento*: area dove la diffusione dell'organismo nocivo rende impossibile la sua eradicazione, per cui vanno messe in atto azioni per il suo confinamento;
- *zona tampone*: fascia perimetrale limitrofa alla zona focolaio o di insediamento, nella quale non è stata ancora riscontrata la presenza del patogeno;
- *zona di sicurezza*: fascia perimetrale limitrofa alla zona tampone a ulteriore garanzia del contenimento del patogeno.

Nel frattempo, la Commissione Europea consultò l'Autorità Europea per la Sicurezza Alimentare (EFSA), l'agenzia indipendente dell'Unione Europea che fornisce pareri scientifici in caso di rischi per la salute. Il 26 novembre 2013, l'EFSA pubblicò un report (EFSA Journal, 2013) confermando che non esistevano precedenti di eradicazione del batterio in zone con numerose specie vegetali suscettibili e insetti vettori. Concordava con il piano pugliese di rimozione delle piante infette, monitoraggio continuo degli insetti vettori e restrizioni sulla movimentazione delle specie vegetali ospiti fuori dalla zona infetta.

Nel febbraio del 2014, dopo un'ispezione condotta dall'Ufficio Alimenti e Veterinaria (FVO) dell'EFSA, furono scoperti 7 nuovi focolai di infezione, situati a nord di Taviano, confermando la diffusione dell'epidemia nella provincia di Lecce. A settembre del 2014, il Ministero delle Politiche Agricole (Mipaaf) istituì un Comitato Tecnico Scientifico, che includeva Donato Boscia tra i membri, per fornire supporto al Comitato Fitosanitario Nazionale. Nel

frattempo, l'epidemia di *Xylella* continuava a diffondersi, come confermato da un monitoraggio condotto dall'FVO nel novembre del 2014, indicando un significativo peggioramento della situazione rispetto a febbraio dello stesso anno. Nel comitato tecnico furono coinvolti esperti di riconosciuta fama internazionale come Alexander Purcell e Rodrigo Almeida, entrambi professori presso l'Università della California e rinomati esperti di *Xylella fastidiosa*, coinvolta anche nella Malattia di Pierce che colpisce la vite. La Figura 2.1 riporta una carta del Salento con i primi focolai di CoDiRO.

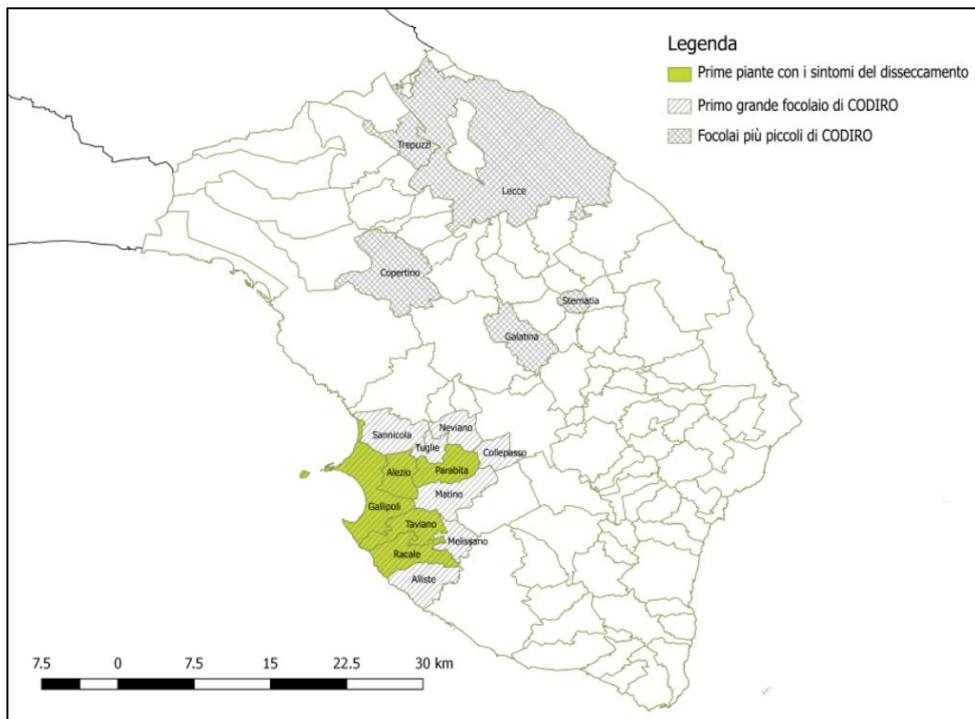


Figura 2.1: Comuni del Salento con i primi sintomi del disseccamento degli olivi (2008) e i primi focolai di CoDiRO (2014) (FONTE: CIERVO, Margherita, et al. Il disseccamento degli ulivi in Puglia. Evidenze, contraddizioni, anomalie, scenari. 2020.)

Alla fine del 2014, l'Ufficio Fitosanitario Regionale della Puglia ha pubblicato un documento (Puglia, R., 2014) chiamato "Linee Guida per il Controllo dell'*Xylella fastidiosa*". In questo documento sono state definite le strategie per gestire la diffusione del batterio. Nel documento è stata definita una "zona infetta" che copre l'intera provincia di Lecce, dove purtroppo il batterio non può più essere eliminato. Per sulla base di quanto riportato nella Delibera di Giunta Regionale 1842/2014 e nel Decreto ministeriale 2777/2014, oltre a quanto

indicato nella Decisione comunitaria 2014/497/UE, nella zona infetta vanno adottati:

- abbattimento volontario delle piante infette a seguito di richiesta dell'interessato all'UPA di Lecce e previa autorizzazione da parte dello stesso;
- trattamenti fitosanitari e operazioni agronomiche per il controllo degli insetti vettori potenzialmente infettanti;
- lavorazione del terreno o fresatura del terreno o trinciatura delle erbe in almeno 2 periodi dell'anno;
- potatura obbligatoria ogni due anni.

Accanto a questa area infetta, è stata creata una "zona cuscinetto", spessa 2 chilometri, dove è prioritario evitare la presenza del batterio. È un'area in cui vanno attuate tutte le misure necessarie per mantenerla indenne. In particolare, vanno adottate le seguenti misure:

- monitoraggio intensivo delle piante ospiti per la ricerca dell'organismo specificato nel periodo più opportuno;
- controllo delle popolazioni di insetti vettori accertati o potenziali;
- interventi agronomici contro gli stadi giovanili dei vettori e controllo delle piante spontanee erbacee;
- eliminazione di tutte le piante ospiti non produttive presenti in alberature stradali, spartitraffico, fossi, canali, aree verdi, ecc...

Inoltre, è stato identificato un cordone fitosanitario, di larghezza di 2 km e posto a Nord della zona cuscinetto, per aggiungere un ulteriore livello di protezione contro la diffusione dell'infezione adottando le stesse misure previste per la zona cuscinetto.

All'interno della zona cuscinetto, è stata stabilita una "fascia di eradicazione" larga 1 chilometro, dove tutte le piante infette dovevano essere rimosse. Queste misure avevano l'obiettivo di impedire la propagazione dell'infezione verso nord, dove si trovavano molti ulivi, inclusi quelli secolari, protetti da una legge di stato. In particolare, vanno adottate le seguenti misure:

- monitoraggio costante per individuare le piante infette o con sintomi evidenti di infezione;

- estirpazione immediata delle piante risultate infette o con presenza di evidenti sintomi ascrivibili a *X. fastidiosa*;
- controllo degli insetti vettori potenzialmente infettanti mediante trattamenti fitosanitari e operazioni agronomiche obbligatorie;
- estirpazione di tutte le piante ospiti non produttive presenti in alberature stradali, spartitraffico, fossi, canali, aree verdi, ecc.

L'EFSA pubblicò un secondo report in data 6 gennaio 2015 (EFSA Journal, 2015), in seguito a molteplici sopralluoghi del FVO, dove vengono proposte possibili soluzioni per contenere l'avanzamento dell'epidemia. Il 10 febbraio 2015 il Consiglio dei Ministri dichiara lo stato di emergenza in Puglia e l'11 febbraio viene nominato Commissario delegato per l'emergenza Xylella l'allora Comandante regionale del Corpo Forestale Giuseppe Silletti. A metà di marzo 2015 viene pubblicato il "Piano Silletti", contenente l'insieme di misure fitosanitarie per il contenimento del batterio e la ripartizione delle misure economiche necessarie. Il piano aggiorna l'estensione della zona infetta (Figura 2.2), che ora comprende l'intera provincia di Lecce, e della zona cuscinetto, situata a nord della zona infetta e che attraversa la regione dal Mar Adriatico allo Ionio. Rimangono invariate le estensioni del cordone fitosanitario a nord della zona cuscinetto, e della fascia di eradicazione. I principali fondamenti delle strategie di contenimento dell'epidemia consistono nell'estirpazione delle piante infette e nel monitoraggio continuo degli insetti vettori. Le zone di contenimento e cuscinetto sono state ridefinite nuovamente in data 18 maggio 2015, in seguito alla "decisione di esecuzione" (De Filippis, R., 2019) da parte dell'Unione Europea, ampliandole rispettivamente a 20 e 10 chilometri.

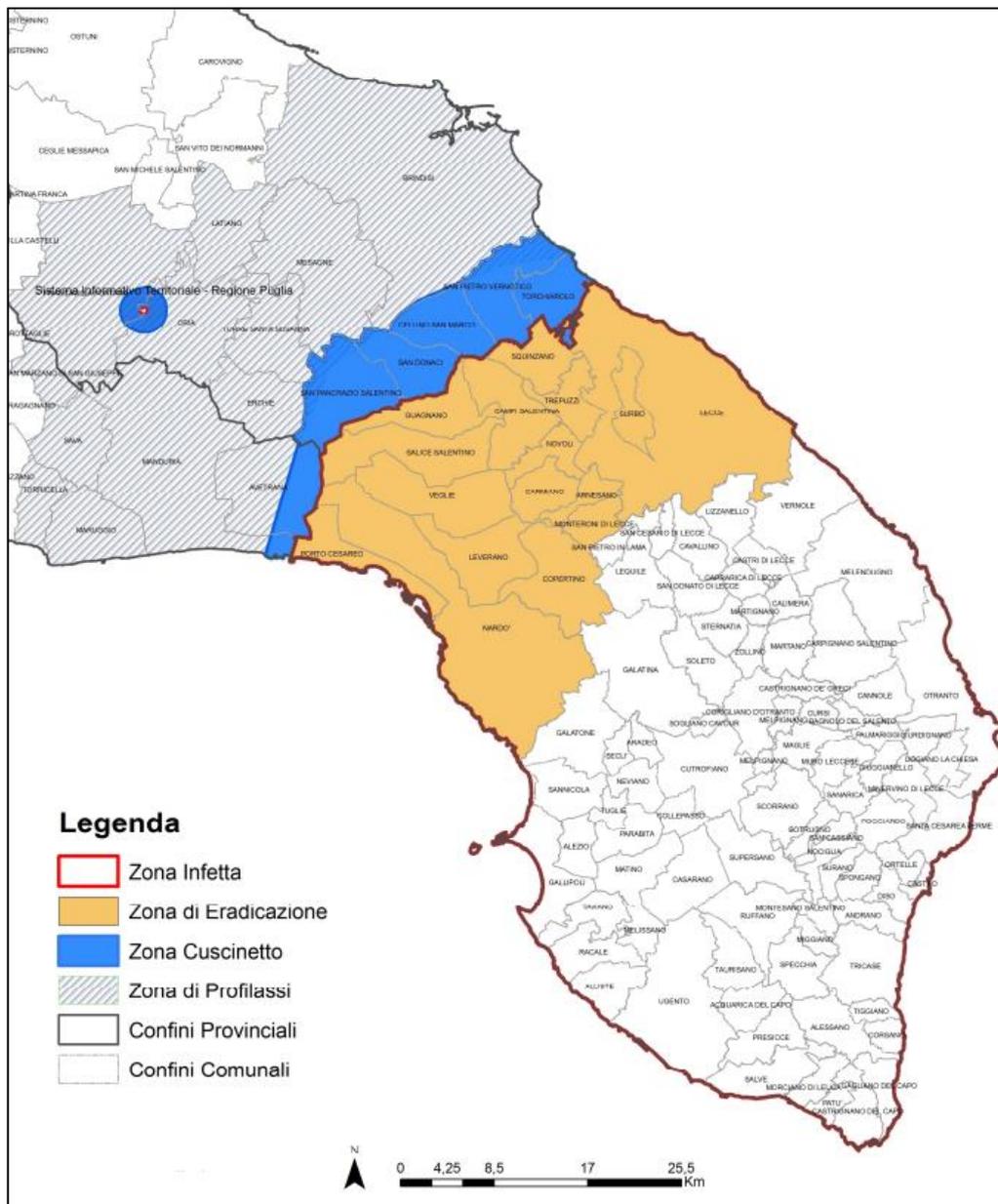


Figura 2.2: Determinazione dirigenziale n. 54 del 13 marzo 2015. Terza definizione delle aree delimitate per *Xylella fastidiosa* (FONTE: www.ulivi.sit.puglia.it)

L'attuazione del piano Silletti inizia nell'aprile 2015 con l'abbattimento di 7 alberi di ulivo nell'agro di Oria in provincia di Brindisi, che nel mese precedente divenne un nuovo focolaio. L'abbattimento fu aspramente contestato da circa cinquanta manifestanti, giunti sul posto fin dall'alba per tentare di impedirli, senza successo. Le proteste dei manifestanti riuscirono tuttavia ad impedire successivi abbattimenti nell'agro di Veglie, poco distante da Oria. Dopo un breve periodo di quiete, ad Oria vengono estirpati altri 38 alberi a luglio 2015, in un clima tutt'altro che sereno: in accordo con la Prefettura di Lecce, gli abbattimenti

non saranno più programmati per impedire la preventiva mobilitazione dei manifestanti, divenendo dei veri e propri blitz supportati dalle Forze dell'Ordine, e a questa decisione seguì un pattugliamento continuo delle campagne da parte dei cittadini di Oria. L'attuazione del piano Silletti fu ulteriormente ostacolata da numerose sentenze dei Tar, che hanno bloccato le pratiche di eradicazione per coloro che facevano ricorso.

Le pratiche di estirpazione furono ampliate, coinvolgendo ogni pianta in grado di ospitare *Xylella* nel raggio da una pianta infetta, indipendentemente dal loro stato di salute, in seguito alla pubblicazione del piano Silletti bis a luglio 2015. Prevede che venga riorganizzato il monitoraggio nelle zone cuscinetto e di contenimento site nell'area infetta, nella zona di sorveglianza e, in presenza di nuovi focolai, che vengano individuate e geo referenziate tutte le piante ospiti sintomatiche e asintomatiche nel raggio di 200 metri. Vengono definiti i nuovi confini della zona cuscinetto che viene spostata a nord, inglobando il focolaio di Oria, mentre viene dichiarata infetta la zona che comprende i comuni di Torchiarolo, S. Pietro V. e Cellino S. Marco, in provincia di Brindisi, come rappresentato cartograficamente nella Figura 2.3. Tale piano recepiva le indicazioni della Commissione Europea, ma non fu mai messo in atto a causa di un forte movimento oppositorio popolare e dagli interventi della magistratura, culminati il 18 dicembre 2015 col sequestro di tutti gli ulivi interessati dal piano da parte della procura di Lecce. Il commissario Silletti si dimise il 24 dicembre 2015, sfiduciato e indagato dalla magistratura.

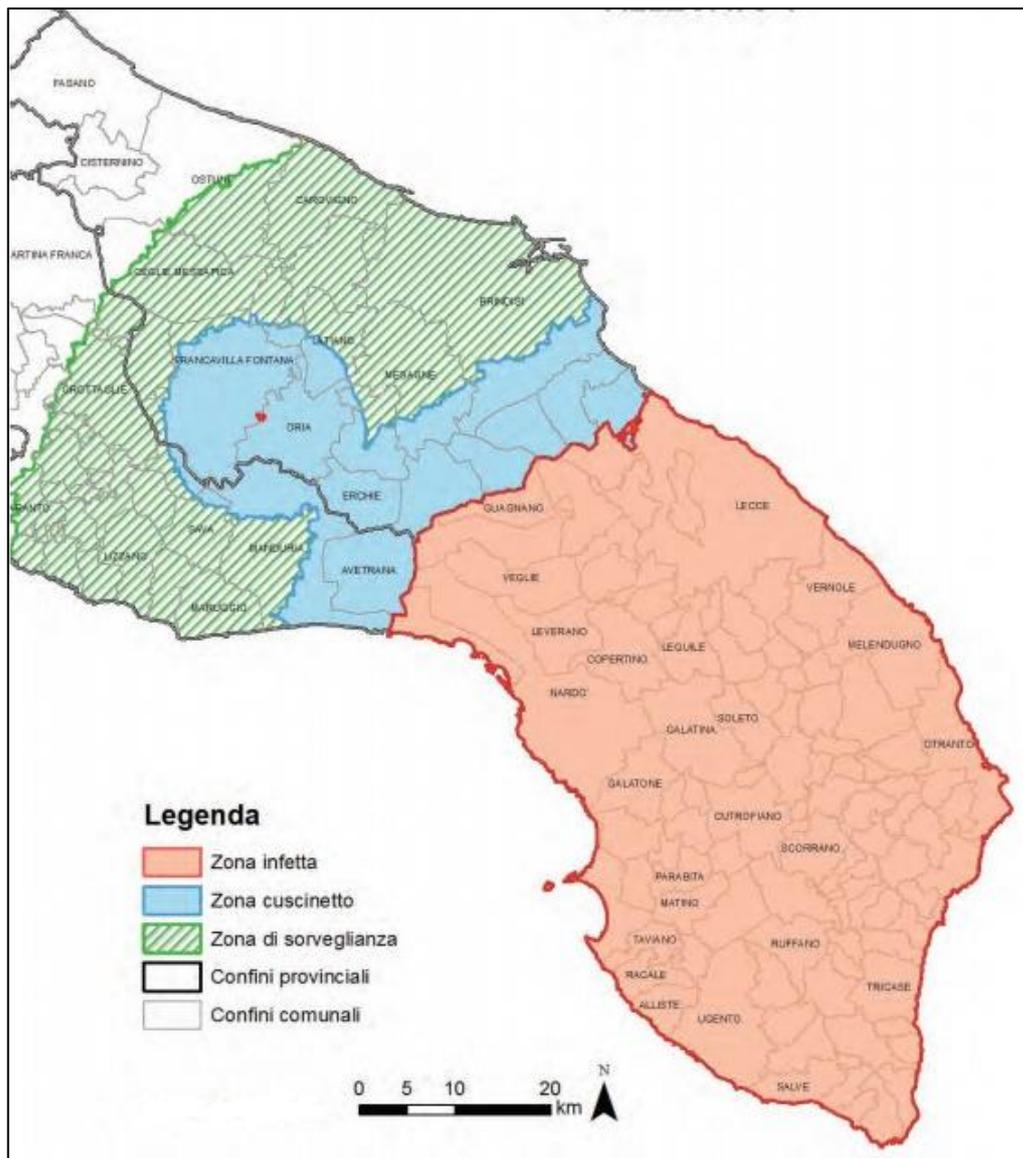


Figura 2.3: Ridefinizione delle zone di contenimento del batterio *Xylella*, in seguito alla pubblicazione del piano Silletti bis (FONTE: www.emergenzaxylella.it)

Ad oggi gli ulivi presenti in Salento non sono più in pericolo di contagio ed estirpazione, in quanto la zona infetta e di contenimento hanno subito ulteriori modifiche, espandendosi verso nord. L'avanzamento del contagio risulta tuttavia inarrestabile, minacciando anche gli ulivi monumentali presenti nella zona del barese, di gran lunga più numerosi rispetto al Salento. Il mondo politico sembra essersi ravveduto negli ultimi tempi, comprendendo la necessità di attuare azioni concrete per fermare l'epidemia e dando meno seguito alle teorie complottistiche. Tuttavia, non è stata mai trovata una soluzione definitiva per

debellare la Xylella, e ciò viene confermato da un report dell'EFSA del 15 maggio 2019 (EFSA Journal, 2019).

Le contromisure adottate dalla regione Puglia, definite nell'ambito del Piano d'azione 2021, pubblicato nel bollettino ufficiale Regione Puglia (Burp) n.55 de 20.04.2021 hanno posto dei freni alla riproduzione dell'insetto vettore, con un conseguente netto rallentamento della diffusione del contagio. Tra il 2013 e il 2015 l'epidemia si è diffusa nel territorio regionale percorrendo circa 25 km l'anno, mentre dal 2021 ad oggi compie tragitti pari a circa 2 km all'anno.

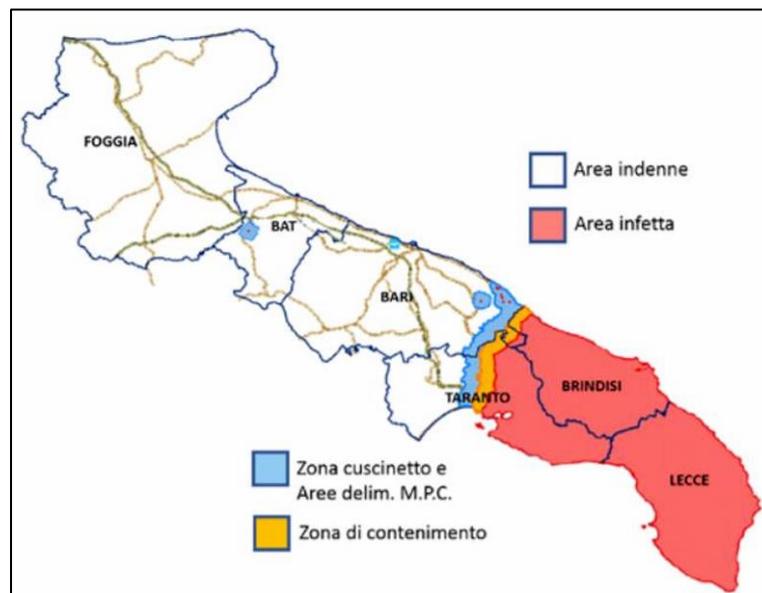


Figura 2.4: Aggiornamento diffusione della Xylella (FONTE: Infoxylella, Misure di contenimento e prevenzione, aprile 2021, p. 4)

La Figura 2.4 illustra la ridefinizione delle aree di contenimento, in base a dati di monitoraggio e al Regolamento UE 2020/1201:

- Area indenne: comprende le province di Foggia, BAT, Bari (parzialmente) e Taranto (parzialmente);
- Area infetta: in corrispondenza delle province di Lecce, Brindisi, Taranto (in parte) ed il Comune di Locorotondo;
- Zona di contenimento: zona ampia 5 km, in cui è obbligatoria l'estirpazione delle piante infette a seguito di analisi in laboratorio;
- Zona cuscinetto: fascia larga 5 km dove, in caso di positività di una pianta è prevista l'estirpazione anche di tutte le piante nel raggio di 50 metri, indipendentemente dal loro stato di salute;

- Aree delimitate di M. P. C. (Monopoli, Polignano, Canosa): queste nuove aree derivano da nuovi focolai risalenti al 2020. Sono previste misure di eradicazione tanto nella zona infetta (50 metri) quanto in quella di contenimento (2.5 km).

Le misure fitosanitarie per contrastare la diffusione sono state via via ridefinite, grazie al progressivo aumento dell'estensione delle aree contagiate e al continuo aggiornamento delle procedure di monitoraggio e di contenimento della diffusione. Di seguito vengono elencati i principali avvenimenti (FONTE: www.emergenzaxylella.it):

- 12 agosto 2016: **Determinazione del Dirigente della Sezione Agricoltura del 12 agosto 2016, n. 289** - Approvazione manuale delle procedure per il monitoraggio alla Xylella fastidiosa.
- 13 dicembre 2016: **Delibera della Giunta Regionale del 13 Dicembre 2016 n. 1999** Aggiornamento delle "Misure fitosanitarie" per contrastare la diffusione della Xylella fastidiosa sul territorio regionale, redatte ai sensi dell'art. 15 lettera a) del DM del 19/06/2015 e s.m.i.
- 24 ottobre 2018: **Delibera della Giunta Regionale del 24 Ottobre 2018 n. 1890** - Azioni di contrasto alla diffusione della Xylella Fastidiosa per il 2018-2019, in applicazione della decisione di esecuzione (UE) 789/2015 e s.m.i.
- 23 novembre 2018: **Determinazione del Dirigente Sezione Osservatorio Fitosanitario 23 novembre 2018, n. 727** - Approvazione dell'aggiornamento delle procedure di monitoraggio e campionamento di specie vegetali ai fini dell'identificazione di Xylella fastidiosa nella Regione Puglia.
- 21 aprile 2020: **Delibera della Giunta Regionale del 21 Aprile 2020 n. 548** - Approvazione del Piano per l'annualità 2020: I) "Azioni di contrasto alla diffusione della Xylella fastidiosa subspecie pauca ST53" II) "Misure fitosanitarie di controllo dei vettori per contrastare la diffusione di Xylella fastidiosa subspecie pauca ST53".
- 6 aprile 2021: **Xylella, la Giunta approva il Piano di azione 2021. Pentassuglia: "Un documento programmatico sulle azioni di contrasto alla xylella e, in particolare, sulle modalità di sorveglianza di tutto il territorio regionale"**.

- 14 maggio 2021: **DDS 39/'21 -Determinazione del Dirigente Sezione Osservatorio Fitosanitario 14 maggio 2021, n. 39** - Approvazione delle Procedure di attuazione della sorveglianza, campionamento, analisi di specie vegetali per il contrasto ed il controllo di *Xylella fastidiosa* e applicazione delle misure di estirpazione delle piante infette.
- 14 marzo 2022: **Deliberazione della Giunta Regionale n. 343 del 14 marzo 2022** - Approvazione "Piano d'azione per contrastare la diffusione di *Xylella fastidiosa* (Well et al.) in Puglia".
- 13 maggio 2022: **DDS 31/'22 -Determinazione del Dirigente Sezione Osservatorio Fitosanitario 13 maggio 2022, n. 31** - Aggiornamento delle procedure di monitoraggio e campionamento di specie vegetali ai fini dell'identificazione di *Xylella fastidiosa* nella Regione Puglia.

Le zone di contenimento attualmente in vigore sono visibili su una sezione apposita del geoportale regionale dedicata all'emergenza fitosanitaria da *Xylella* (www.emergenzaxylella.it). È disponibile un servizio WMF, la cui interfaccia è illustrata in Figura 2.5, che permette di visualizzare ortofoto acquisite in diversi anni, particelle catastali in tutta la regione, olivi monitorati e tutte le aree di contenimento aggiornate in tempo reale.



Figura 2.5: Aree di contenimento attualmente in vigore per contrastare la diffusione del batterio *Xylella* (FONTE: <http://webapps.sit.puglia.it/freewebapps/DatiFasceXF/index.html>)

3. Conseguenze dell'epidemia sulla regione

Per avere un'idea grossolana del danno, effettivo e ancora potenziale, che il “caso Xylella” ha recato al territorio pugliese, è sufficiente comprendere quanto l'ulivo ne rappresenti l'identità. Esso è presente sullo stemma della Regione Puglia, in quanto elemento caratterizzante del suo paesaggio. In Puglia sono presenti circa 65 milioni di ulivi (in gran parte presenti in Salento) e molti di questi sono millenari (ossia con un'età plurisecolare), perciò tutelati da una legge dello Stato e dichiarati come “monumento naturale” dalla Regione Puglia (Ubaldi, 2021). Il patrimonio olivicolo pugliese è riportato in Tabella 3.1.

Regione	Provincia	n. piante TOTALI	di cui			
			n. piante > 30 anni	n. piante < 30 anni	n. piante > 100 anni	n. piante < 100 anni
		(a)	(b)	(c = a - b)	(d)	(e = a - d)
Puglia	Bari	22.722.772	17.335.469	5.387.303	8.806.526	13.916.246
	Lecce	12.581.940	10.781.915	1.800.025	2.899.839	9.682.101
	Foggia	9.242.093	7.438.501	1.803.592	2.047.359	7.194.734
	Brindisi	7.891.935	5.405.353	2.486.582	2.225.116	5.666.819
	Taranto	5.667.873	5.202.558	465.315	1.009.723	4.658.150
TOTALE PUGLIA		58.106.613	46.163.796	11.942.817	16.988.561	41.118.052
	% Puglia =100	100,0	79,4	20,6	29,2	70,8
TOTALE ITALIA		199.363.842	146.977.334	52.386.508	43.070.283	156.293.559
	% ITA =100	100,0	73,7	26,3	21,6	78,4
	% Puglia / ITA	29,1	31,4	22,8	39,4	26,3

Tabella 3.1: Patrimonio olivicolo della regione Puglia (FONTE: SIAN 2013)

La rapida diffusione dell'epidemia è attribuita ad una concomitanza di diversi fattori (Strona et al., 2017), come l'abbondanza di ulivi, le loro grandi dimensioni (grazie alla loro età media e alla mancata potatura di alcuni esemplari) e il clima temperato per favorire la proliferazione batterica. Le conseguenze a livello economico della diffusione del batterio Xylella sono state molto gravi a causa del grande mercato che ruota attorno all'olio d'oliva. Nel panorama nazionale, la Puglia rappresenta la prima regione in materia di olivicoltura, sia in termini di produzione annuale di olive (36% del totale nazionale) sia in base agli ettari di terreno impiegati (34% dei terreni con ulivi in Italia) (Ciervo et al., 2020). L'intero comparto genera un fatturato intorno ai 600 milioni di euro, il 16% del valore dell'intera PLV agricola regionale (ns.

elaborazioni su dati ISTAT 2010). La provincia di Lecce è uno dei principali poli di produzione, grazie alla presenza di circa 70000 aziende olivicole e oltre 150000 ettari di superficie agricola utilizzata (SAU) (ISTAT, 2010). Fin dall'epoca dei Romani, l'olio pugliese ha goduto di una reputazione di eccellenza, venendo commercializzato in tutto l'Impero, dai mercati di Alessandria d'Egitto fino alle bancarelle di Londra. Si presume che gli ulivi più antichi, alcuni dei quali risalenti a oltre duemila anni fa, siano stati piantati addirittura dai coloni greci. Fino a pochi decenni fa, piantare un ulivo era un gesto celebrativo per segnare una nascita, e questi alberi facevano parte del patrimonio che si tramandava di generazione in generazione. L'ulivo rappresenta un'eredità culturale e identitaria di inestimabile valore per l'intera regione, e ciò spiega l'aspra opposizione del suo popolo alle misure di abbattimento imposte dall'Europa. Dai dati riportati emerge quindi la grande rilevanza del settore olivicolo nell'area di studio, nonché il forte impatto che la diffusione del CoDiRO sta esplicando in termini sia produttivi che paesaggistici. La produzione totale di olive ha infatti subito un calo significativo, come riportato in uno stralcio di dati ISTAT relativi al periodo 2006-2018 (Figura 3.1).

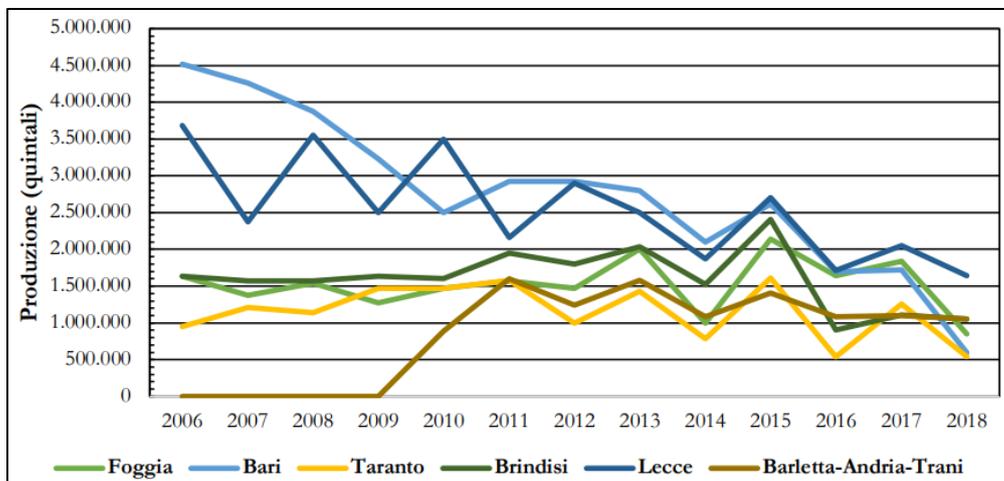


Figura 3.1: Produzione di olive (quintali) delle provincie pugliesi (FONTE: ISTAT)

Anomalie interessano anche l'espansione della superficie destinata alla coltivazione degli ulivi, soprattutto nella provincia di Lecce nel corso dell'ultimo decennio. In questo periodo, si è assistito a un costante aumento della superficie olivicola, che è cresciuta in modo significativo (un aumento di oltre 6.500 ettari, passando da 89.400 ettari nel 2010 a 95.980 ettari nel 2018). Questa crescita è in

netto contrasto con la tendenza pressoché stabile riscontrata nelle altre province (Figura 3.2) e, ciò che è ancora più sorprendente, è avvenuta nonostante l'epidemia fitopatogena che ha colpito gli ulivi e nonostante il divieto, istituito nel 2014, di reimpiantare piante appartenenti alle stesse varietà degli ulivi infettati dal *Xylella fastidiosa*. Parallelamente all'incremento della superficie destinata alla coltivazione degli ulivi, a partire dal 2013, si è verificato un significativo e inspiegabile restringimento della differenza tra la superficie olivicola totale e quella effettivamente in produzione nella provincia di Lecce, nonostante l'evidente presenza dell'epidemia in corso (Figura 3.3).

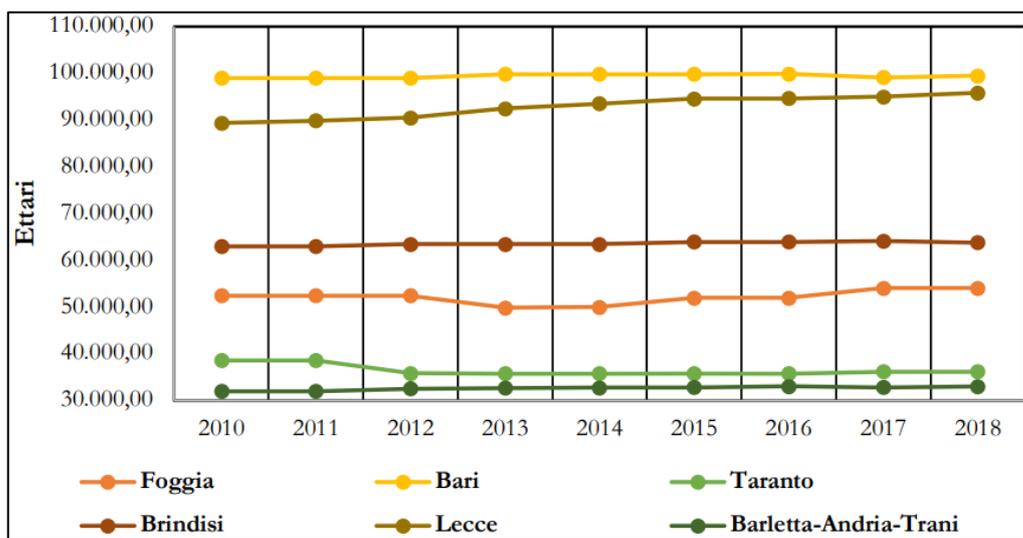


Figura 3.2: Superficie in produzione ad olivo (ha), Puglia, 2010 – 2018 (FONTE: elaborazioni su dati ISTAT)

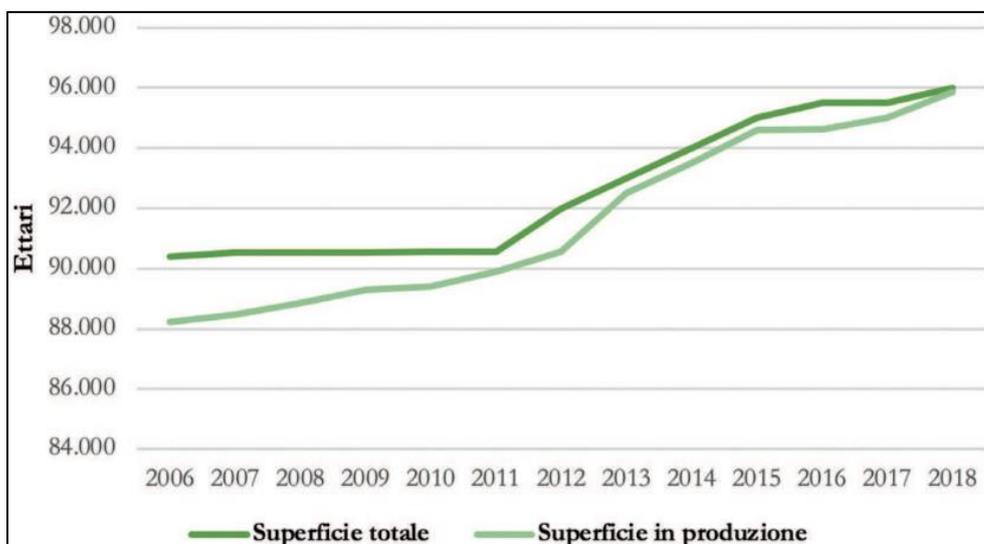


Figura 3.3: Superficie ad olivo (totale e in produzione), provincia di Lecce, 2006 - 2018 (FONTE: elaborazioni su dati ISTAT)

Le informazioni relative ai dati strutturali, alle tecniche colturali e ai dati di bilancio rappresentano la base conoscitiva utile per la stima del danno. Tuttavia, la valutazione dell'impatto è molto complessa sia per la molteplicità dei soggetti coinvolti sia per l'incertezza circa la natura e le strategie di intervento. Il danno agli olivicoltori consiste principalmente nella perdita della pianta colpita dal CoDiRO e destinata all'estirpazione, quantificabile entro un intervallo di € 111 - € 119 per pianta, al variare della grandezza dell'azienda agricola coinvolta. Tali cifre sono state calcolate ipotizzando un periodo, successivo all'eradicazione della pianta e tale da permettere il reimpianto e il ripristino delle condizioni produttive presenti al momento dell'espanto dell'albero, pari a 50 anni (Dell'Anna, S., 2021). A questo si affianca, per le imprese olivicole del Salento non colpite dall'infezione, l'incremento dei costi derivanti dall'implementazione degli interventi colturali volti a contrastare la diffusione della malattia, così come indicato nelle linee guida regionali (mediamente +31%). Nello specifico, le modifiche previste dalle linee guida regionali e da apportare alla gestione dell'oliveto prevedono:

- la riduzione del turno di potatura, da quinquennale ad almeno biennale, con conseguente dimezzamento della quantità di legna prodotta commercializzabile;
- una più accurata gestione del suolo;
- interventi fitosanitari aggiuntivi per la lotta agli insetti vettori della *Xylella Fastidiosa*.

Anche la stima del danno alla collettività regionale per la perdita dei benefici paesaggistici generati dall'olivicoltura Salentina (€ 64/albero) ha evidenziato una forte sensibilità e attenzione verso tale bene non di mercato, per il quale il decisore pubblico dovrebbe concentrare tutti gli sforzi necessari al fine di evitarne la scomparsa. Va infine precisato che ad oggi non è possibile avanzare una stima del danno su scala comprensoriale in quanto il monitoraggio circa la diffusione della malattia è ancora in corso. Tuttavia, l'ampia estensione dell'area interessata, congiuntamente alla gravità della malattia, fanno facilmente intuire conseguenze a dir poco drammatiche per l'olivicoltura provinciale e dunque per l'economia dell'intero territorio. Inoltre, il rischio di diffusione della malattia oltre i confini provinciali richiede la messa a punto di strategie di intervento

incisive e coordinate di tutte le istituzioni pubbliche coinvolte (Regione Puglia, Stato nazionale e Unione Europea).

3.1 Interventi di riqualificazione dei terreni colpiti da Xylella

Dopo l'eradicazione degli alberi contagiati da Xylella, è necessario riqualificare le aree rimaste incolte per ripristinare l'ambiente e compensare le conseguenze dello sviluppo dell'emergenza fitosanitaria. Il decreto legge n.27 del 2019, recante “Disposizioni urgenti in materia di rilancio dei settori agricoli in crisi”, ha stabilito un “Piano straordinario per la rigenerazione del settore olivicolo della Puglia” tramite lo stanziamento di 300 milioni di euro per il biennio 2020 – 2021. La Tabella 3.2 illustra la suddivisione delle risorse tra le 2 annualità e le differenti aree di intervento, resa pubblica mediante D.M. del 11/06/2020.

AZIONI		Milioni di €	MISURE	2020	2021	TOTALE
1	Contrasto alla diffusione della Xylella	5,00	A. Contrasto al vettore ed eliminazione delle fonti di inoculo	2,00	3,00	5,00
2	Ripristino potenzialità produttiva	250,00	A. Rimozione piante disseccate a seguito di Xylella nella zona infetta	5,00	15,00	20,00
			B. Reimpianti e riconversioni tramite cultivar di olivo resistenti	14,00	26,00	40,00
			C. Riconversioni verso altre colture	10,00	15,00	25,00
			D. Salvaguardia olivi secolari o monumentali	1,00	4,00	5,00
			E. Sostegno al reddito: interventi compensativi imprese agricole	85,00	35,00	120,00
			F. Interventi compensativi in favore dei frantoi oleari	20,00	15,00	35,00
			G. Sostegno alle imprese vivaistiche	2,00	3,00	5,00
3	Rilancio economia rurale aree danneggiate	10,00	A. Contratti di filiera e di distretto	-	5,00	5,00
			B. Diversificazione dell'economia rurale e accorpamento fondiario	-	5,00	5,00
4	Azioni orizzontali	25,00	A. Comunicazione e informazione	2,00	3,00	5,00
			B. Ricerca e sperimentazione	5,00	15,00	20,00
5	Monitoraggio e rete laboratori	10,00	A. Potenziamento rete laboratori pubblici	2,00	3,00	5,00
			B. Monitoraggio e diagnostica	2,00	3,00	5,00
TOTALE AZIONI		300,00	TOTALE MISURE	150,00	150,00	300,00

Tabella 3.2: Dettaglio sulla distribuzione delle risorse pubblicato nel D.M. 11/06/2020
(FONTE: Stralcio del D.L. 27/2019, art. 2)

La Regione Puglia ha successivamente assicurato la copertura finanziaria del “Piano d’azione per contrastare la diffusione di Xylella fastidiosa (Well et al.) in Puglia 2023-2024” per un importo pari a € 3.620.000,00 per il 2023 e € 4.020.000,00 per il 2024 a valere sugli esercizi 2023 - 2024 del Bilancio Gestionale, approvato con Deliberazione della Giunta regionale n. 2 del 20/01/2022. La Tabella 3.3 esplica i fondi stanziati per ciascuna attività di riqualificazione.

Capitolo Bilancio autonomo	Declaratoria	Stanz. Ini. 2023	Stanz. Ini. 2024
U0111034	INTERVENTI URGENTI PER LA PREVENZIONE, IL CONTROLLO E LA ERADICAZIONE DEL BATTERIO DA QUARANTENA XYLELLA FASTIDIOSA. TRASFERIMENTI CORRENTI AD AMMINISTRAZIONI LOCALI	500.000,00	500.000,00
U0111038	SPESE PER L'ATTIVITA' DEL SERVIZIO FITOSANITARIO REGIONALE, ANCHE IN CONVENZIONE CON ENTI DI RICERCA, PER MONITORAGGIO E CONTROLLO MALATTIE DA QUARANTENA E CERTIFICAZIONE MATERIALE VIVAISTICO . ACQUISTI ALTRI BENI DI CONSUMO	20.000,00	20.000,00
U0111039	INTERVENTI URGENTI PER LA PREVENZIONE, IL CONTROLLO E LA ERADICAZIONE DEL BATTERIO DA QUARANTENA XYLELLA FASTIDIOSA. TRASFERIMENTI CORRENTI AL RESTO DEL MONDO	300.000,00	300.000,00
U0111041	INTERVENTI URGENTI PER LA PREVENZIONE, IL CONTROLLO E LA ERADICAZIONE DEL BATTERIO DA QUARANTENA XYLELLA FASTIDIOSA. TRAFERIMENTI CORRENTI AD AMMINISTRAZIONI CENTRALI	400.000,00	400.000,00
U0111042	INTERVENTI URGENTI PER LA PREVENZIONE, IL CONTROLLO E LA ERADICAZIONE DEL BATTERIO DA QUARANTENA XYLELLA FASTIDIOSA. TRAFERIMENTI CORRENTI AD ALTRE IMPRESE	100.000,00	500.000,00
U0111044	INTERVENTI URGENTI PER LA PREVENZIONE, IL CONTROLLO E LA ERADICAZIONE DEL BATTERIO DA QUARANTENA XYLELLA FASTIDIOSA. ACQUISTO ALTRISERVIZI	1.000.000,00	1.000.000,00
U0111057	INTERVENTI URGENTI PER LA PREVENZIONE, IL CONTROLLO E LA ERADICAZIONE DEL BATTERIO DA QUARANTENA XYLELLA FASTIDIOSA. SPESE PER RAPPRESENTANZA, ORGANIZZAZIONE DI EVENTI, PUBBLICITA' E SERVIZI PER TRASFERTA.	200.000,00	200.000,00
U0111058	INTERVENTI URGENTI PER LA PREVENZIONE, IL CONTROLLO E LA ERADICAZIONE DEL BATTERIO DA QUARANTENA XYLELLA FASTIDIOSA. STAMPA E RILEGATURA.	100.000,00	100.000,00
U0111059	INTERVENTI ASSEGNATI AD ARIF CON LEGGE 19/2019 PER LA PREVENZIONE, IL CONTROLLO E LA ERADICAZIONE DEL BATTERIO DA QUARANTENA XYLELLA FASTIDIOSA.	1.000.000,00	1.000.000,00
		3.620.000,00	4.020.000,00

Tabella 3.3: Dettaglio stanziamenti per il biennio 2023 2024 (FONTE: Bollettino Ufficiale della Regione Puglia - n. 139 del 27-12-2022)

Le opzioni scelte per riconvertire i terreni colpiti da Xylella sono molteplici, con diversi gradi di efficacia e fattibilità (Dell'Anna, S., 2021):

- **Sovrainnesto:** un primo tentativo adottato per affrontare l'emergenza fitosanitaria in Puglia è stato il progetto di sovrainnestare piante di ulivo con varietà resistenti al patogeno. L'obiettivo era utilizzare varietà di ulivo meno suscettibili alla malattia, come il Leccino e la Fs17 (nota anche col nome "Favolosa") (Giampetruzzi et al., 2016; Boscia et al., 2017), per creare una barriera naturale contro la diffusione della Xylella. Nel 2017 sono stati innestati 1.000 ulivi con 250 varietà diverse su un terreno a Presicce, che è diventato il più grande campo sperimentale per questa iniziativa. I risultati sono stati analizzati da ricercatori del Cnr di Bari, ma il progetto ha affrontato diverse

complicazioni. Ad esempio, molte piante sono rimaste malate nonostante l'innesto, e c'è stato un timore di perdita di varietà e qualità degli ulivi. A distanza di quattro anni, a Presicce nessuna pianta è sopravvissuta, a causa dello stato avanzato della malattia. Inoltre, il costo elevato del sovrainnesto ha reso necessario un sostegno finanziario da parte del governo; la sezione “salvaguardia degli ulivi secolari e monumentali” della Tabella 3.2 è dedicata proprio per questo tipo di intervento. In alcune zone meno colpite, la tecnica potrebbe essere utile per limitare la diffusione della malattia in quanto risulta efficace se adottata in maniera preventiva, per incrementare le possibilità di sopravvivenza degli ulivi ancora sani appartenenti a varietà vulnerabili al patogeno.

- **Pannelli fotovoltaici:** dopo l'abbandono della prima soluzione, è stata adottata una seconda idea molto criticata: utilizzare aree agricole dismesse per creare parchi fotovoltaici ed eolici. Questo ha portato a un significativo consumo di suolo in Puglia, soprattutto nella provincia di Lecce, con la perdita di 40.000 ettari di terreno nel solo 2020, di cui 493 ettari per la costruzione di impianti fotovoltaici. Nel periodo 2019-2020, i parchi fotovoltaici a terra hanno consumato circa il 37% del suolo pugliese, secondo i dati dell'Ispra, superato solo dalla Sardegna. Coldiretti Puglia e Coldiretti Italia hanno denunciato la perdita di oltre 157.000 ettari di suolo agricolo a causa dei parchi rinnovabili, facendo appello alla Regione Puglia affinché impedisca l'uso del suolo agricolo per tali scopi e trovi soluzioni alternative, come l'uso di aree industriali dismesse o tetti di edifici. Va notato che il consumo di suolo non è dovuto solo ai parchi rinnovabili, ma anche agli incendi e alla riduzione della linea costiera, causati dal cambiamento climatico e dalla speculazione edilizia. Questi problemi stanno avendo un impatto significativo sul paesaggio italiano, in particolare in Puglia, Sardegna e Sicilia.

- **Espianto e reimpianto di ulivi:** il Piano per il biennio 2020 – 2021 ha previsto lo stanziamento di 40 milioni di euro in totale (Tabella 3.2), cifra rivelatasi del tutto insufficiente per fronteggiare le esigenze degli agricoltori. Grazie a questi fondi sono stati finanziati 23 progetti collettivi e 521 domande, che equivalgono solo al 6% di tutte le istanze. Inoltre, la spesa prevista per la misura di salvataggio dei frantoi ammonta a 6 milioni di euro, nonostante ci siano complessivamente 35 milioni di euro disponibili. Questa situazione è dovuta ai requisiti di accesso che, purtroppo, escludono le strutture dismesse o

vendute all'estero dall'accesso ai fondi. Ulteriori interventi di estirpazione e reimpianto delle varietà Leccino e Favolosa sono stati effettuati tra il 2018 e il 2019 tramite i fondi del precedente bando, e continuano grazie ai nuovi finanziamenti riportati in Tabella 3.3.

- **Diversificazione colturale:** questo approccio, recentemente sviluppato, si basa sulla scoperta che alcune piante da frutto, come il ciliegio dolce e il mandorlo, sono resistenti o immuni al patogeno, a differenza degli ulivi. Coldiretti Lecce ha proposto di incentivare la diversificazione agricola, inclusa l'avicoltura e l'orticoltura, come parte del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Questo ha portato a fondi di 25 milioni di euro per la piantumazione di nuove colture nelle aree colpite dalla Xylella. Tuttavia, una legge regionale che permetteva la piantumazione di alberi da frutto è stata abrogata dalla Corte costituzionale. Dopo il supporto dell'Assessore all'Agricoltura della Regione Puglia e dei ricercatori, è stata nuovamente concessa l'opportunità di piantare alberi da frutto nelle zone infette. Il Dipartimento Agricoltura e Sviluppo Rurale della Regione Puglia (Dajs) ha preso l'iniziativa, insieme ai sindaci della provincia di Lecce, per promuovere progetti di rigenerazione sostenibile e riforestazione. Questo ha portato a oltre 300 ettari di terreno messi a disposizione da imprese e cittadini per la creazione di boschi. Il progetto di riforestazione è coordinato dal Dajs e supportato da diverse istituzioni accademiche e scientifiche. L'obiettivo non è solo il ripristino del territorio colpito dalla Xylella, ma anche la realizzazione di un "distretto a carbon neutral" sfruttando il potenziale di stoccaggio e assorbimento della CO₂. Il progetto è in fase di avvio e rappresenta un'importante iniziativa di rigenerazione ambientale per la regione.

4. Il ruolo del telerilevamento

Negli ultimi anni, si è assistito a un sostanziale cambiamento nei metodi di indagine territoriale, con una graduale sostituzione dei tradizionali approcci basati su monitoraggio strumentale e osservazione visiva. Questa evoluzione ha portato all'adozione di metodologie più sofisticate ed economicamente più vantaggiose, riducendo notevolmente sia il tempo necessario sia l'impegno finanziario richiesto. Il telerilevamento, chiamato in letteratura anglosassone Remote Sensing, è la disciplina tecnico – scientifica che permette di ricavare informazioni sull'ambiente e su oggetti posti a distanza, mediante misure di radiazione elettromagnetica emessa, riflessa o trasmessa dalle superfici in esame. In tal modo è possibile ottenere un quadro generale del sito in esame, consentendo lo svolgimento di analisi distribuite nello spazio e nel tempo. Il Telerilevamento è quindi una scienza applicata con finalità diagnostico – investigative che permette di identificare, misurare ed analizzare le caratteristiche qualitative e quantitative di un determinato oggetto, area o fenomeno, senza entrarne in contatto diretto, offrendo un'informazione globale sull'ambiente e sul territorio. Nel presente studio, con questo strumento è stata studiata l'evoluzione del contagio da Xylella in tre diversi focolai, mediante un trade off tra diverse risoluzioni delle grandezze caratteristiche del telerilevamento (spaziale, temporale, spettrale).

4.1 Lo spettro elettromagnetico

Lo spettro elettromagnetico rappresenta la distribuzione dell'energia elettromagnetica (collegamento tra il sensore remoto ed il fenomeno in esame) ordinata per lunghezze d'onda λ crescenti. Nonostante tale distribuzione abbia una natura continua, per ragioni pratiche ed operative è stato suddiviso in intervalli, chiamati bande spettrali, schematizzate in Figura 4.1.

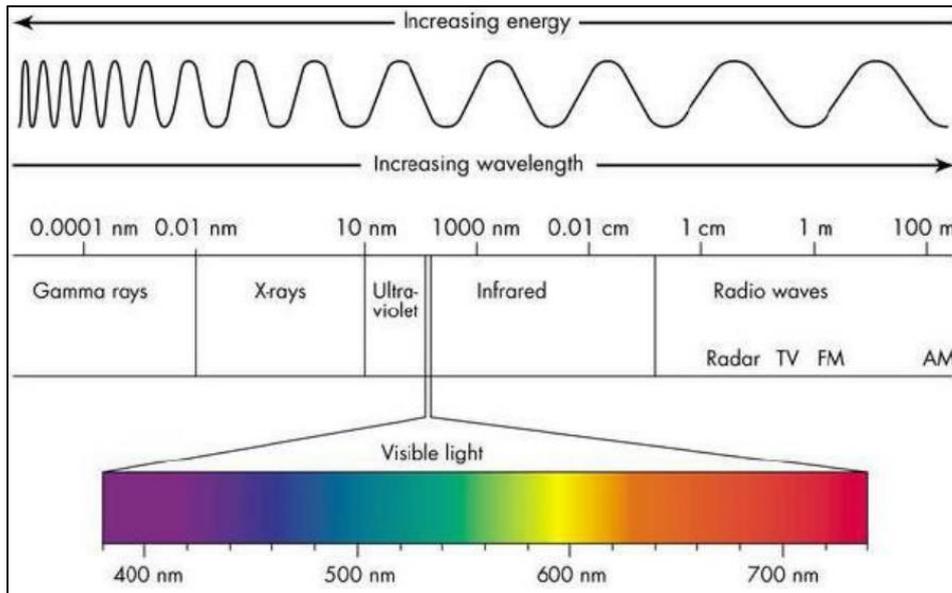


Figura 4.1: Rappresentazione delle bande spettrali

Considerando la distribuzione dell'energia in relazione alla lunghezza d'onda, le varie modalità di interazione con la materia e le caratteristiche di trasparenza atmosferica, è possibile suddividere concettualmente lo spettro utilizzato nei sistemi di telerilevamento in due fasce principali: la finestra ottica e la finestra radar. La finestra ottica è compresa fra i 100 nm ed i 20 μm di lunghezza d'onda e l'energia studiata è quella riflessa od emessa in forma naturale dalle superfici. A livello pratico – operativo la finestra dell'ottico è costituita da tre bande principali, rappresentate nella Tabella 4.1 con le relative sottobande.

Banda	Banda	Intervallo λ	Ampiezza $\Delta\lambda$	Intervallo ν
Ultravioletto UV	Ultravioletto	100 – 380 nm	280 nm	3000 – 789 THz
Visibile VIS	Violetto	380 – 430 nm	50 nm	789 – 697 THz
	Blu	430 – 475 nm	45 nm	697 – 631 THz
	Blu-verde	475 – 490 nm	15 nm	631 – 612 THz
	Verde	490 – 550 nm	60 nm	612 – 545 THz
	Giallo	550 – 580 nm	30 nm	545 – 517 THz
	Arancio	580 – 620 nm	40 nm	517 – 484 THz
	Rosso	620 – 750 nm	130 nm	484 – 400 THz
Infrarosso IR	IR vicino NIR	0.75 – 0.9 μm	0.15 μm	400 – 333 THz
		0.9 – 1.3 μm	0.40 μm	333 – 231 THz
	IR onde corte SWIR	1.5 – 2.5 μm	1.00 μm	200 – 120 THz
	IR onde medie MWIR	3.5 – 5.2 μm	1.70 μm	86 – 58 THz
	IR termico TIR	7.0 – 20 μm	13 μm	43 – 15 THz

Tabella 4.1: Bande principali della finestra ottica, con relative sottobande (FONTE: https://amslaurea.unibo.it/2640/1/Proietti_Gabriele_tesi.pdf)

La finestra radar è invece compresa fra 1 mm ed 1 m di lunghezza d'onda e l'energia studiata è quella attivata e quindi ricevuta, in maniera artificiale, attraverso un'apposita antenna. Utilizzando queste onde, i radar possono rilevare oggetti, misurare distanze e velocità, e ottenere informazioni dettagliate anche in condizioni atmosferiche avverse o in assenza di luce visibile.

4.2 Firme spettrali

La maggior parte dei sistemi di telerilevamento si concentra sulle porzioni dello spettro elettromagnetico in cui le lunghezze d'onda vengono riflesse principalmente dalle superfici, rendendo così le proprietà di riflessione delle superfici di grande interesse. Questo processo di riflessione dipende principalmente da due fattori: la scabrezza della superficie e la lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Un parametro fondamentale e frequentemente misurato nel telerilevamento è la riflettività ρ , che identifica la "firma spettrale" di una superficie. Questa firma spettrale, o "spectral signature", ci fornisce una misura della capacità di una particolare superficie di riflettere l'energia incidente a diverse lunghezze d'onda. Questo concetto può essere espresso in modo matematico attraverso la seguente relazione (4.1):

$$\rho_{\lambda} \% = \frac{\phi_r}{\phi_i} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Dove:

- ρ_{λ} = riflettività in funzione della lunghezza d'onda;
- ϕ_r = flusso radiante riflesso dalla superficie;
- ϕ_i = flusso radiante incidente.

Le misure di riflettività interessano, in genere, la regione dello spettro compresa fra l'ultravioletto e l'infrarosso; la curva di riflettanza descrive quindi l'andamento della riflettività per una data superficie nell'intervallo spettrale $\lambda = 0.4 \div 2.5 \mu\text{m}$.

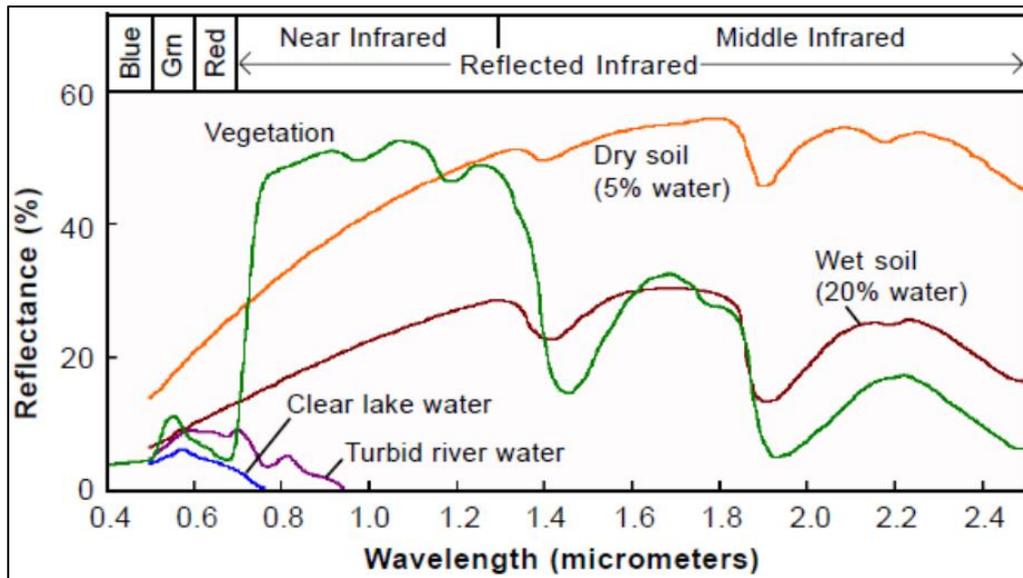


Figura 4.2: Firme spettrali delle diverse tipologie di suolo

La Figura 4.2 evidenzia come la natura delle superfici sia uno dei principali fattori che influenza le rispettive firme spettrali:

- l'**acqua** è trasparente alle basse lunghezze d'onda del visibile, corrispondenti al blu-verde ($0.4\mu\text{m} < \lambda < 0.6\mu\text{m}$), mentre è completamente assorbente nella regione dell'infrarosso;
- il **suolo** risulta avere un comportamento strettamente correlato al suo contenuto d'acqua, diminuendo la propria riflettività all'aumentare del grado di saturazione. Le firme spettrali di diversi tipi di suolo forniscono informazioni importanti su altre proprietà degli stessi, come la presenza di ossidi di ferro (assorbimento delle radiazioni blu-verdi, spostamento cromatico verso il rosso-arancio), o di materia organica (abbassamento del valore della riflettanza spettrale, che nel visibile comporta una tendenza verso toni più scuri);
- la **vegetazione** ha un comportamento molto interessante, e la sua firma spettrale rappresenta il fondamento teorico dello studio effettuato. Risulta avere un picco di assorbenza in corrispondenza della lunghezza d'onda associata al rosso ($0.6\mu\text{m} < \lambda < 0.7\mu\text{m}$), mentre risulta avere un massimo relativo di riflessione nella regione del "verde" ($0.5\mu\text{m} < \lambda < 0.6\mu\text{m}$) e un massimo assoluto nella regione del NIR ("Near Infrared", $0.7\mu\text{m} < \lambda < 1.3\mu\text{m}$).

La firma spettrale vegetativa è influenzata principalmente da 3 fattori:

- **pigmenti delle foglie:** la porzione di energia riflessa nel campo visibile (VIS) è legata alla presenza di pigmenti delle foglie come la clorofilla, la xantofilla e il carotene. In particolare, la clorofilla (che costituisce il 65% dei pigmenti) è responsabile delle due bande di assorbimento nel blu (0,45 μm) e nel rosso (0,66 μm) e della massima riflettività relativa nel verde (0,50 μm). Questo effetto è dovuto in particolare ai cloroplasti che contengono granuli dove sono situati i diversi tipi di clorofilla. D'altra parte, i carotenoidi conferiscono quelle tonalità giallo-arancio alle foglie povere di clorofilla o prive di clorofilla;
- **contenuto d'acqua:** nel dominio dell'infrarosso a corta lunghezza d'onda (SWIR), compreso tra 1,35 e 2,70 μm , le proprietà spettrali della vegetazione dipendono strettamente dal contenuto di acqua nelle foglie. Come abbiamo visto, a 1,4 μm , 1,9 μm e 2,6 μm si verificano intensi fenomeni di assorbimento della radiazione da parte dell'acqua, mentre anche i massimi relativi di riflessione a 1,65 μm e 2,2 μm sono in parte influenzati dal contenuto di acqua delle foglie. In questo modo, le lunghezze d'onda di assorbimento, analogamente ai suoli, possono diventare diagnostiche per quanto riguarda lo stress idrico delle piante.
- **struttura delle foglie:** questo fenomeno è responsabile del comportamento spettrale nelle bande dell'infrarosso vicino (NIR), comprese tra 0,70 e 1,35 μm . Per struttura delle foglie, in questo contesto, intendiamo l'organizzazione spaziale delle cellule fogliari con riferimento alle evidenze morfologiche che variano da una specie all'altra. La radiazione infrarossa non interagisce con i cloroplasti ma è fortemente influenzata dalla struttura della foglia, che causa una riflessione molto elevata, dell'ordine del 30-70%, dell'energia incidente. La porzione di energia residua viene principalmente trasmessa, ovvero è molto limitata. Infatti, da un lato i pigmenti fogliari e la cellulosa che costituisce le pareti cellulari sono trasparenti e, dall'altro, l'acqua contenuta nella foglia presenta fenomeni di assorbimento deboli (<10%). All'inizio dell'intervallo del NIR, la riflettività passa bruscamente da pochi punti percentuali a valori vicini al 50%, con un forte gradiente intorno a 0,8 μm : il livello del plateau di riflettività è più elevato quanto più il tessuto è costituito da cellule con forme irregolari e contenuto eterogeneo. La riflettività e la trasmissività hanno valori simili, con una certa prevalenza della riflettività, che

può raggiungere il valore limite dell'80%, come nel caso dell'olivo. Questo fenomeno, nel campo del telerilevamento, è di importanza fondamentale perché è alla base delle possibilità di analisi più significative del mondo vegetale. Infatti, poiché il mesofillo, cioè lo strato fogliare situato tra la parte superiore e inferiore dell'epidermide della foglia, è più o meno sviluppato a seconda dello stato di salute della pianta, della varietà specifica e dello stadio fenologico (cioè delle relazioni tra il clima e i processi di fioritura o produzione delle foglie), lo studio della riflessione nel NIR diventa un potente strumento di indagine, sia per discriminare diverse specie che per analizzare gli stadi evolutivi e determinare eventuali patologie all'interno della stessa comunità vegetale.

4.3 Indici di Vegetazione

L'analisi dei segnali spettrali nel range visibile-infrarosso, attraverso la valutazione degli indici di riflessione, consente la creazione di vari Indici di Vegetazione (IV) mediante complesse combinazioni matematiche (Cao et al. 2015). Questi indici hanno il vantaggio di mitigare alcune problematiche legate alla fase di acquisizione delle immagini, come la distorsione geometrica, l'instabilità radiometrica dei sensori, gli effetti atmosferici e topografici (Maselli, 2006). Inoltre, tali indici rivelano specifici stress subiti dalle piante, consentendo il monitoraggio a distanza dello stato di salute delle stesse. Ciò, a sua volta, offre la possibilità di valutare le esigenze delle piante in termini di acqua, nutrienti e fertilizzanti. Nella Figura 4.3 sono elencati alcuni tra i più comuni indici di vegetazione proposti in letteratura.

Vegetation index	Equation	Reference
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (R_{800} - R_{670}) / (R_{800} + R_{670})$	Rouse et al. (1974)
Chlorophyll Index	$CI = \frac{R_{750}}{R_{710}}$	Zarco-Tejada et al. (2001)
Normalized Difference Index	$NDI = (R_{706} - R_{664}) / (R_{704} + R_{664})$	Delegido et al. (2011)
MERIS Terrestrial Chlorophyll Index	$MTCI = (R_{754} - R_{709}) / (R_{709} - R_{681})$	Dash and Curran (2007)
Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index	$MCARI = ((R_{700} - R_{670}) - 0.2(R_{700} - R_{550})) \left(\frac{R_{700}}{R_{670}} \right)$	Haboudane et al. (2004)
Green Normalized Difference Vegetation Index	$GNDVI = (R_{800} - R_{550}) / (R_{800} + R_{550})$	Gitelson et al. (1996)
Pigment Specific Simple Ratio A	$PSSRa = \frac{R_{800}}{R_{680}}$	Blackburn (1998)
Sentinel-2 Red-Edge Position	$S2REP = 705 + 35 \frac{R_{783} + R_{665} - R_{705}}{R_{740} - R_{705}}$	W. J. Frampton et al. (2013)
Inverted Red-Edge Chlorophyll Index	$IRECI = (R_{783} - R_{665}) / (R_{705} + R_{740})$	W. J. Frampton et al. (2013)
Renormalized Difference Vegetation Index	$RDVI = (R_{800} - R_{670}) / \sqrt{(R_{800} + R_{670})}$	Roujean and Breon (1995)
Modified Simple Ratio	$MSR = \frac{R_{800} / R_{670} - 1}{(R_{800} / R_{670})^{1.5} + 1}$	Chen (1996)
Transformed Chlorophyll Absorption Ratio	$TCARI = 3 \left(\frac{(R_{700} - R_{670}) - (-0.2(R_{700} - R_{550}) \frac{R_{700}}{R_{670}})}{R_{700} - R_{550}} \right)$	Haboudane et al. (2002)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index	$OSAVI = (1 + 0.16) \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 0.16}$	Rondeaux et al. (1996)
Modified Soil-Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = (1 + L) \frac{R_{800} - R_{670}}{R_{800} + R_{670} + L}$	Qi et al. (1994)
TCARI/OSAVI	$TCARI/OSAVI = \frac{TCARI}{OSAVI}$	Haboudane et al. (2002)
Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index 1510	$MCARI1510 = ((R_{700} - R_{1510}) - 0.2(R_{700} - R_{550})) \left(\frac{R_{700}}{R_{1510}} \right)$	Herrmann et al. (2010)
Transformed Chlorophyll Absorption Ratio 1510	$TCARI1510 = 3 \left(\frac{(R_{700} - R_{1510}) - (-0.2(R_{700} - R_{550}) \frac{R_{700}}{R_{1510}})}{R_{700} - R_{550}} \right)$	Herrmann et al. (2010)
Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index 1510	$OSAVI1510 = (1 + 0.16) \frac{R_{800} - R_{1510}}{R_{800} + R_{1510} + 0.16}$	Herrmann et al. (2010)
Red Green Ratio Index	$IRG = R_{670} - R_{550}$	Gamon and Surfus (1999)
Perpendicular Vegetation Index	$PVI = \frac{R_{800} - aR_{670} - b}{\sqrt{a^2 + 1}}$	Richardson and Wiegand (1977)
Ratio Vegetation Index - Simple Ratio 800/670	$RVI = \frac{R_{800}}{R_{670}}$	Pearson and Miller (1972)
Adjusted Transformed Soil-Adjusted VI	$ATSAVI = a \frac{R_{800} - aR_{670} - b}{aR_{800} + R_{670} - ab + x(1 + a^2)}$	Baret and Guyot (1991)
Atmospherically Resistant Vegetation Index	$ARVI = \frac{R_{800} - R_{670} - \gamma(R_{670} - R_{450})}{R_{800} + R_{670} - \gamma(R_{670} - R_{450})}$	Bannari et al. (1995)
Global Environment Monitoring Index	$GEMI = n(1 - 0.25n) \frac{R_{670} - 0.125}{1 - R_{670}}$ $n = \frac{2(R_{800}^2 - R_{670}^2) + 1.5R_{800} + 0.5R_{670}}{R_{800} + R_{670} + 0.5}$	Pinty and Verstraete (1992)
Difference Vegetation Index	$DVI = gR_{800} - R_{670}$	Richardson and Wiegand (1977)
Aerosol Free Vegetation Index 1600	$AFRI1510 = R_{800} - 0.66 \frac{R_{1600}}{R_{800} + 0.56R_{1600}}$	Karnieli et al. (2001)
Aerosol Free Vegetation Index 2100	$AFRI2100 = R_{800} - 0.5 \frac{R_{2100}}{R_{800} + 0.56R_{2100}}$	Karnieli et al. (2001)

Figura 4.3: Elenco di indici di vegetazione (IV) proposti in letteratura (FONTE: Sripada, Ravi P., et al., 2006)

NDVI

L'NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al., 1974) risulta essere l'indice, tra quelli presenti in letteratura, più comune usato per analisi sullo stato vegetativo. Può assumere valori compresi tra -1 e +1, comparando i valori di riflettività nel rosso con quelli nella banda dell'"infrarosso vicino" (NIR) tramite la seguente relazione (4.2):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (4.2)$$

Valori positivi di tale indice corrispondono ad aree vegetate, poiché hanno una riflettività maggiore nell'infrarosso, mentre valori prossimi allo zero indicano la presenza di suolo prevalentemente urbanizzato o nudo, con una copertura vegetata molto bassa o inesistente. I corpi idrici superficiali presentano valori negativi, in quanto l'acqua presenta una riflettività piuttosto bassa nella banda dell'infrarosso. Tale indice, pertanto, può essere utilizzato per fornire importanti informazioni circa lo stato di salute della vegetazione, in quanto lo stress idrico delle foglie, o addirittura la morte delle stesse, comporta un sostanziale cambiamento dei livelli di riflettività nelle diverse bande spettrali (Figura 4.4).



Figura 4.4: Riflettività della vegetazione nelle diverse bande, in base allo stato di salute delle foglie (FONTE: [INDICI DI VEGETAZIONE NDVI E NDMI – FARMBOOK \(wordpress.com\)](http://www.farmbook.com))

Questo algoritmo, oltre ad essere di semplice applicazione, offre un beneficio aggiuntivo, in quanto consente di ridurre drasticamente le dimensioni dei dati. Questo avviene attraverso la sostituzione di due bande spettrali con una singola, il che può consentire una codifica più efficiente dei dati.

Tuttavia, l'utilizzo dell'NDVI per valutazioni quantitative solleva una serie di problematiche che possono limitare notevolmente l'utilità effettiva di questo indice se non vengono adeguatamente affrontate. Inoltre, spesso l'NDVI viene utilizzato in contesti per cui non è stato originariamente progettato, il che può portare a interpretazioni errate. Qui di seguito sono elencati alcuni di questi problemi:

- **Informazioni ridotte:** matematicamente, la somma e la differenza dei due canali spettrali contengono le stesse informazioni dei dati originali. Tuttavia, l'NDVI rappresenta solo una frazione di queste informazioni. Se le informazioni mancanti sono rilevanti o importanti per l'utente, è fondamentale capire che l'NDVI fornisce solo una visione parziale dei dati originali;
- **estrapolazioni non supportate:** gli utenti spesso cercano di stimare numerose proprietà della vegetazione basandosi sull'NDVI, come l'indice di area fogliare, la biomassa, la concentrazione di clorofilla nelle foglie, la produttività delle piante e altro ancora. Queste relazioni spesso derivano da correlazioni tra i valori dell'NDVI e le misurazioni a terra di queste variabili. Tuttavia, queste relazioni possono essere problematiche poiché le misure satellitari coprono aree molto più vaste rispetto alle misurazioni a terra, e non tutte queste caratteristiche ambientali sono direttamente correlate tra loro;
- **registrazione delle immagini:** le misure di riflettanza dovrebbero provenire dalla stessa area e essere acquisite simultaneamente. Questo può essere difficile da ottenere con strumenti che acquisiscono canali spettrali diversi con telecamere diverse o piani focali separati. Una registrazione inaccurata delle immagini può portare a errori significativi e risultati non affidabili;
- **effetti atmosferici:** la composizione dell'atmosfera, in particolare il vapore acqueo e l'aerosol, può influenzare notevolmente le misurazioni spaziali. Senza un'adeguata correzione, le misurazioni dell'NDVI possono essere distorte;
- **nuvole e ombre delle nuvole:** la presenza di nuvole, sia spesse che sottili, può influenzare i valori dell'NDVI e portare a interpretazioni errate. Le ombre delle nuvole possono anche causare variazioni nei valori dell'NDVI;
- **effetti del suolo:** la riflettanza delle superfici terrestri può variare in base all'umidità del suolo, il che può influenzare i valori dell'NDVI. Tuttavia, queste

variazioni possono essere erroneamente interpretate come cambiamenti nella vegetazione;

- **effetti anisotropici:** le superfici riflettono la luce in modo diverso in diverse direzioni e a diverse angolazioni. Questa anisotropia può influenzare i valori dell'NDVI, specialmente se la posizione del bersaglio all'interno della fascia dello strumento o il tempo di passaggio del satellite cambiano;
- **effetti spettrali:** poiché diversi sensori hanno bande spettrali con posizioni, larghezze e forme diverse, l'applicazione di una formula standard come l'NDVI produce risultati diversi tra strumenti diversi.

L'uso dell'NDVI per scopi quantitativi richiede una comprensione approfondita di queste problematiche e, spesso, la necessità di misure correttive per ottenere risultati accurati e affidabili. Pertanto, in questo studio verrà proposto un confronto tra NDVI e altre tipologie di indici vegetativi, in modo tale da riconoscere, per più tipologie di dati con diverse risoluzioni geometriche e spettrali, quali sono le metodiche più adatte per riconoscere in tempo utile eventuali anomalie che comportano lo stato vegetativo.

GARI

Il Green Atmospherically Resistant Vegetation Index (Bannari et al., 1995), assume la stessa funzione di monitoraggio dello stato di salute delle piante, col vantaggio di correggere le imprecisioni dovute allo scattering legato all'atmosfera terrestre grazie al parametro γ . L'indice vegetativo viene determinato tramite la relazione (4.3).

$$GARI = \frac{NIR - RED + \gamma(BLUE - RED)}{NIR + RED - \gamma(BLUE - RED)} \quad (4.3)$$

Tale indice può essere tarato in funzione di γ , che dipende dalla tipologia prevalente di aerosol atmosferico. Non disponendo di un modello di aerosol di riferimento, si ritiene opportuno porre $\gamma = 1$, semplificando la formula nel seguente modo (4.4):

$$GARI = \frac{NIR - (2 \cdot RED) + BLUE}{NIR + (2 \cdot RED) - BLUE} \quad (4.4)$$

GLI

Il Green Leaf Index assume valori compresi tra -1 e 1, valori negativi corrispondono ad aree non vegetate (terreno o urbanizzato) mentre valori positivi corrispondono ad aree vegetate (Louhaichi, M. et al., 2001: 65-70). Tale indice viene calcolato tramite la relazione (4.5).

$$GLI = \frac{(GREEN - RED) + (GREEN - BLUE)}{(2 GREEN) + RED + BLUE} \quad (4.5)$$

GNDVI

Il Green Normalized Difference Vegetation Index (Gitelson et al. 1996) si calcola in modo simile all'NDVI, come descritto in precedenza. Tuttavia, la differenza fondamentale è che il GNDVI mette in relazione la banda del Near-Infrared (NIR) con la banda del verde (4.6), ossia le due bande dello spettro in cui la vegetazione riflette maggiormente. Queste bande sono particolarmente sensibili alle caratteristiche della vegetazione. Ciò che rende il GNDVI un indice

interessante è la sua maggiore sensibilità al contenuto di clorofilla rispetto all'NDVI.

$$GNDVI = \frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN} \quad (4.6)$$

Il motivo di questa maggiore sensibilità è che la banda del verde è più efficiente della banda del rosso nel rilevare la presenza di clorofilla nelle piante. La clorofilla è una componente essenziale per la fotosintesi delle piante ed è strettamente connessa al contenuto di azoto, essendo un elemento chiave nella struttura molecolare della clorofilla stessa. Di conseguenza, il GNDVI può essere un indicatore più preciso della salute e della condizione delle piante, poiché riflette meglio la quantità di clorofilla presente, e quindi, indirettamente, il contenuto di azoto nelle piante. Questo lo rende un indice utile per valutare la salute delle colture, la fertilità del suolo e altri aspetti legati alla vegetazione. (Dimitris Sykas, 2021).

IPVI

L'Infrared Percentage Vegetation Index (RAY, Terrill W., et al., 1993) ha una struttura molto simile a quella dell'NDVI, che sfrutta la differenza di risposta della copertura vegetale nelle bande spettrali del visibile (rosso) e del vicino infrarosso (4.7).

$$IPVI = \frac{NIR}{NIR + RED} \quad (4.7)$$

Questo indice è strettamente legato all'NDVI, tanto da ricavarne il valore direttamente da quest'ultimo indice, secondo la seguente formula (4.8).

$$IPVI = \frac{1}{2} \cdot (NDVI + 1) \quad (4.8)$$

Secondo tale formula i valori che può assumere tale indice sono compresi tra 0 e 1, e ha il vantaggio di essere più facile da applicare.

SAVI

L'indice SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) è una versione modificata dell'NDVI (Huete, 1988), progettato per correggere l'effetto del suolo nudo quando si valuta la copertura vegetativa, ed è particolarmente utile in aree con una bassa copertura vegetale (meno del 40%). In queste aree, la riflettanza del suolo può influenzare notevolmente i valori di riflettanza nel rosso e nell'infrarosso, alterando così i risultati dell'NDVI. Dal punto di vista matematico, l'espressione del SAVI è simile a quella dell'NDVI, ma include un parametro di correzione della luminosità del suolo (L) che varia da 0 (equivalente all'NDVI in aree con copertura vegetale elevata) a 1 (equivalente a aree senza copertura vegetale). Questo parametro L è utilizzato per regolare l'influenza del suolo nudo sulla misurazione della riflettanza. Questo L viene determinato tramite la relazione (4.9).

$$SAVI = \frac{(NIR - RED) \cdot (1 + L)}{NIR + RED + L} \quad (4.9)$$

MSAVI

Il Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI) è un indice simile al SAVI, sviluppato per correggere l'influenza del suolo nudo sulla valutazione della copertura vegetativa. L'espressione matematica per il calcolo del MSAVI è identica a quella del SAVI, ma la differenza principale sta nel modo in cui il parametro L è determinato. Nel caso del SAVI, il parametro L è funzione della copertura vegetale del suolo, il che richiede la conoscenza di questa informazione specifica per il terreno in esame. Tuttavia, nel caso del MSAVI, il parametro L è calcolato come il coefficiente angolare di una "soil-line" identificata in un grafico che ha per ascissa i valori di riflettanza nella banda rossa (Red Band) e per ordinata i valori di riflettanza nell'infrarosso vicino (NIR). Questo approccio elimina la necessità di conoscere la copertura vegetale specifica del suolo, rendendo il calcolo del MSAVI più semplice e basato solo sulla riflettanza osservata nelle due bande spettrali. Inoltre, una versione semplificata del MSAVI, denominata MSAVI2, è stata proposta successivamente. Questa formula semplificata (4.10) preserva l'obiettivo di

correggere l'effetto del suolo nudo, ma semplifica ulteriormente il calcolo, eliminando la necessità di identificare la "soil-line" (Qi et al. , 1994).

$$MSAVI2 = \frac{2 NIR + 1 - \sqrt{(2 NIR + 1)^2 - 8 (NIR - RED)}}{2} \quad (4.10)$$

OSAVI

Nella versione "ottimizzata" del SAVI (OSAVI) (Rondeaux et al. nel 1996) il valore di L è stato impostato a 0.16, per una correzione più accentuata della luminosità del suolo ed è particolarmente utile in situazioni in cui si desidera ridurre al minimo l'effetto del suolo nudo sulla stima della copertura vegetale. Come altri indici normalizzati, anche l'Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index ha un range di valori compreso tra -1 e 1, e viene determinato dalla seguente formula (4.11).

$$OSAVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L} \quad (4.11)$$

MTVI2

Il Modified Triangular Vegetation Index (Haboudane et al., 2004) ha lo scopo di quantificare il contenuto di clorofilla presente nelle chiome. Così come la sua precedente versione (Triangular Vegetation Index), si basa sulla triangolazione dello spazio spettrale tra il picco della riflettanza associata alla banda del verde, il minimo dell'assorbimento di clorofilla e la spalla del NIR (4.12), ma risulta essere un indicatore migliore, rispetto al TVI, dell'area fogliare. L'area di tale triangolo aumenta all'aumentare dell'assorbimento di clorofilla e del tessuto fogliare, che comporta un incremento della riflettanza nel NIR.

$$MTVI2 = \frac{1.5 [1.2(NIR - GREEN) - 2.5(RED - GREEN)]}{\sqrt{(2 NIR + 1)^2 - (6 NIR - 5\sqrt{RED})} - 0.5} \quad (4.12)$$

TDVI

Il Transformed Difference Vegetation Index (A. Bannari, 2002) ha lo scopo di misurare il grado di copertura vegetale, minimizzando l'effetto del suolo nudo sottostante, consentendo una migliore valutazione della salute delle piante. Tale fattore risulta determinante quando si tratta di suoli luminosi e secchi, oppure in condizioni di suoli bagnati. Questo indice viene determinato tramite l'equazione (4.13).

$$TDVI = 1.5 \cdot \frac{NIR - RED}{\sqrt{NIR^2 + RED} + 0.5} \quad (4.13)$$

NDMI

Il Normalized Difference Moisture Index (Agricolus) descrive il livello di stress idrico della coltura e si calcola come il rapporto tra la differenza e la somma nell'infrarosso vicino e lo SWIR (4.14). L'interpretazione del valore assoluto dell'NDMI permette di riconoscere immediatamente le zone dell'azienda o del campo che presentano problemi di stress idrico. L'NDMI si interpreta facilmente: i suoi valori variano tra -1 (suolo con copertura vegetale assente) e 1 (copertura vegetale totale, no stress idrico), con un sottointervallo compreso tra -0.4 e 0.4, che indica la presenza di stress idrico. L'indice vegetativo, a differenza di tutti gli altri menzionati precedentemente, richiede dati ad 8 bande per essere calcolato, in quanto la banda dello SWIR non è compresa nei dati satellitari a 4 bande.

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (4.14)$$

5. Analisi della letteratura

Per creare le basi dello studio sull'analisi di change detection sugli impatti della diffusione del batterio Xf sul territorio regionale e raccogliere dati e informazioni preliminari per costruire un'indagine quanto più approfondita sulla diffusione del batterio *Xylella fastidiosa*, è stata condotta una dettagliata analisi della letteratura sulle metodologie innovative di analisi del territorio e di controllo della diffusione dell'insetto vettore, la Sputacchina media. Ad oggi, tali tecniche di telerilevamento risultano molto più efficienti dei classici monitoraggi strumentali e/o visivi, consentendo di individuare la malattia agli albori mediante un monitoraggio continuo. L'intercettazione e l'eliminazione del batterio tramite eradicazione delle piante infette rappresentano attualmente la migliore strategia di contenimento dell'emergenza fitosanitaria, poiché non sono ancora state scoperte delle cure efficaci per preservare la vita dei singoli alberi. La maggior parte dei lavori di ricerca utilizzati per l'analisi del tema della *Xylella fastidiosa* riguarda lavori sperimentali pubblicati su riviste scientifiche che si basano principalmente sull'analisi di dati provenienti da indagini territoriali e su informazioni ricavate da documenti pubblici ufficiali. L'analisi comprende studi condotti in Italia principalmente nel territorio pugliese ma non solo.

Una ricerca attinente all'obiettivo di questo lavoro di tesi è quella affrontata da Stefania Gualano et al. (Gualano, Stefania, et al. "Analisi Assistita da Immagini Aeree ad Elevata Risoluzione Geometrica per il Riconoscimento del Complesso del Disseccamento Rapido dell'Olivio Associato al Batterio *Xylella fastidiosa* in Puglia"), in cui esamina la fotointerpretazione per identificare e classificare le piante impattate dal CoDiRO in un ambiente GIS. A tale scopo sono state utilizzate immagini riprese da aerei relativi a una regione di studio nel Salento (Puglia, Italia) con un'eccellente risoluzione geometrica (ricampionamento a 10 cm) nel visibile e nell'infrarosso vicino. La scoperta di fototipi adatti, morfologicamente in grado di rilevare lo stato di salute alterato delle piante di olivo (stress biotico o abiotico), è stata il fulcro delle misure radiometriche telerilevate. Nello specifico, viste le dimensioni del pixel a terra, è stato creato un geoDataBase di attributi con tre livelli di gravità del sintomo CoDiRO (lieve, media e alta) in funzione della consistenza del disseccamento riscontrato nelle

chiome. La procedura di riconoscimento, avvenuta su immagini in falso colore per un migliore contrasto degli alberi con lo sfondo, ha consentito la classificazione di 450 esemplari di piante d'ulivo, specificando la classe di gravità CoDiRO. Tale metodo potrebbe essere migliorato tramite restituzione stereoscopica in ambiente GIS, o migliorando la risoluzione del pixel a terra tramite Aeromobili a Pilotaggio Remoto (APR), consentendo di cogliere i sintomi della malattia in una fase ancora iniziale (es. disseccamento dei germogli) e di intervenire con maggiore tempestività sull'insorgere di nuovi focolai.

La valutazione dell'idoneità dei metodi d'indagine è stata approfondita nel lavoro di ricerca svolto da Annamaria Castrignanò et al. (Castrignanò, A. et al. 2020: 14.), nella quale viene esaminato l'uso di un veicolo aereo senza pilota (UAV) con un radiometro multispettrale per il rilevamento precoce dell'infezione. Per condurre lo studio sono stati utilizzati quattro voli di droni in tre campi di ulivi nella zona della Puglia, tra il 2017 e il 2019. È stato utilizzato un metodo ibrido di geostatistica e analisi discriminante per classificare il livello di gravità dell'Xfp negli olivi in fase precoce. La convalida incrociata ha mostrato che l'approccio di classificazione non parametrico ha avuto un'accuratezza complessiva di 0,69, un tasso di errore medio di 0,31, un'accuratezza di 0,77 e una probabilità di errore di classificazione di 0,23 per la classe di rilevamento precoce. I risultati supportano l'uso della tecnologia UAV per il rilevamento precoce della Xfp. Tuttavia, la previsione in tempo reale della gravità non era possibile e richiedeva l'analisi post-acquisizione dei dati del drone. Il sistema può essere esteso a diversi tipi di dati di telerilevamento e consente l'uso flessibile di tecniche di apprendimento automatico. Gli autori hanno sottolineato l'uso complementare di diversi sensori di imaging e la fusione dei dati per migliorare il monitoraggio delle malattie. Hanno suggerito alcune priorità per la ricerca futura, compresa la definizione della scala appropriata per la stima della gravità, il confronto tra diversi metodi automatici di valutazione delle malattie e l'implementazione di strategie efficienti di campionamento per la rilevazione precoce dell'infezione.

Un'ulteriore applicazione delle possibili analisi geomatiche sul tema della Xylella è stata svolta da Giuseppe Maggiore et al. (Maggiore, G. et al., 2019:

253.). In questo studio è stato adottato un approccio usato in un'analisi svolta precedentemente, dove in ambiente GIS è stata quantificata la trasformazione del paesaggio dal 1988 al 2016, valutando l'efficacia della pianificazione comunale nel guidare l'espansione urbana. Le mappe adoperate per studiare la diffusione del batterio *Xylella* si basano su classificazione del progetto CORINE Land Cover, mentre la consistenza topologica è stata verificata attraverso rilevamenti sul campo. L'analisi è stata svolta a Spongano (Salento, Italia meridionale), dove la classe degli uliveti è minacciata dalla grave condizione fitosanitaria dell'area, compromettendo le condizioni degli agroecosistemi, col rischio di transizione degli stessi in aree non produttive. I risultati evidenziano l'incoerenza tra ciò che era stato pianificato dal piano urbanistico in passato e come il paesaggio di Spongano si è modificato nel tempo. Questa evidenza suggerisce che sia necessario sviluppare un piano basato sull'apprendimento attraverso l'azione, al fine di plasmare ed adattare i processi di trasformazione territoriale all'imprevedibilità dei sistemi ecologici, sociali ed economici, nonché garantire che tali processi siano sempre orientati alle questioni ambientali. Le conclusioni di queste analisi sottolineano la necessità di un approccio transdisciplinare nell'ambito della pianificazione paesaggistica e urbana. Si evidenzia l'importanza di considerare le interazioni tra processi ecologici e antropici, nonché tra diverse scale ecologiche e livelli istituzionali, per sviluppare una visione olistica dell'evoluzione del paesaggio. Nel caso di Spongano, si enfatizza la necessità di coordinare la pianificazione urbana e agricola per evitare la trasformazione del paesaggio agricolo in aree urbane. Gli sforzi attuali contro la *Xylella* fastidiosa ignorano il contesto sociale e culturale. Si propone l'imposizione di dimensioni minime per nuove costruzioni (tre o cinque ettari) per garantire sostenibilità ed accesso ai finanziamenti pubblici. La diffusione della *X. fastidiosa* in Europa è vista come una minaccia ai paesaggi, richiedendo un approccio di "apprendimento attraverso l'azione" e l'integrazione delle politiche locali e regionali per promuovere l'agricoltura.

Nel novembre 2017, è stato presentato uno studio condotto nell'ambito dei progetti PO-nTE e XF-ACTORS, finanziati dalla Comunità Europea (Zarco-Tejada et. al, 2018). Lo studio si è concentrato sulla rilevazione precoce dell'infezione da *Xylella* fastidiosa nelle piante, utilizzando tecniche di

telerilevamento. Durante una campagna biennale di ricerca nella zona del Salento, condotto da diverse istituzioni come l'Istituto de Agricultura Sostenible - Consejo Superior de Investigaciones Cientificas, Swansea University, Karlsruhe Institute of Technology, Università degli Studi di Bari e il Joint Research Center della Commissione Europea, sono stati osservati circa 200.000 alberi di ulivo utilizzando camere spettroscopiche ad alta risoluzione e termiche montate su aerei a un'altitudine di 500 metri. Le immagini acquisite sono state elaborate attraverso un metodo di segmentazione per estrarre informazioni spettrali e termiche da ciascuna chioma d'albero. Le principali scoperte dello studio includono:

- L'uso dell'indice spettrale NPQI (Normalized Phaeophytinization Index) basato sulla riflettanza nelle bande del blu (415 e 435 nm) come indicatore della degradazione della clorofilla, risultando sensibile alla presenza di *Xylella* anche prima che i sintomi fossero visibili ad occhio nudo (Barnes et al., 1992).
- L'efficacia dell'indice SIF (Solar Induced Fluorescence) e dell'indice CWSI (Crop Water Stress Index) nella rilevazione precoce dell'infezione da *Xylella*. SIF (Grace et al., 2007; Hilker et al., 2008) è calcolato utilizzando i dati di radianza iperspettrale, mentre CWSI (Barnes et al., 2000) è valutato tramite camere termiche per misurare le differenze di temperatura tra la chioma delle piante e l'aria circostante.

Questi risultati hanno dimostrato l'efficacia del metodo nell'identificare l'infezione da *Xylella* anche prima che i sintomi diventassero visibili. Ciò ha aperto la strada a ulteriori progetti, come il progetto Redox (Remote Early Detection of *Xylella*), finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico e coordinato dal Distretto tecnologico aerospaziale (DTA), in collaborazione con il Cnr, l'Enav, e Planetek, che utilizza sensori iperspettrali montati su satelliti, aerei o droni per rilevare precocemente l'infezione e combatterla prima che si diffonda. Questo approccio ha il potenziale per monitorare ampie aree in modo efficiente e ridurre i tempi e i costi rispetto ai metodi tradizionali di campionamento e monitoraggio.

6. Utilizzo di dati multispettrali per monitorare il fenomeno Xylella

Nel presente studio sono stati adoperati strumenti di telerilevamento per svolgere un'analisi qualitativa del cambiamento, nello spazio e nel tempo, degli oliveti pugliesi colpiti dal batterio Xylella. In particolare, i dati utilizzati per questa analisi sono fondamentalmente di 3 tipi:

- **Dati Planet:** I dati Planet sono forniti dalla società Planet Labs, con sede negli Stati Uniti che si specializza nella raccolta e nella distribuzione di immagini satellitari a livello globale. Planet Labs ha costruito e gestisce una costellazione di satelliti in orbita bassa attorno alla Terra, con l'obiettivo di fornire dati geospaziali ad alta frequenza e con una copertura globale. I satelliti di Planet Labs sono noti come CubeSats e sono di piccole dimensioni. Questi CubeSats sono progettati per essere compatti, leggeri e facilmente lanciabili, consentendo una costellazione di satelliti numerosa. Questi dati hanno il grande vantaggio di avere un'alta risoluzione temporale. I numerosi satelliti che costituiscono la costellazione sono posizionati in orbite polari, consentendo acquisizioni multiple in una stessa area geografica, fornendo più dati relativi ad uno stesso giorno. Questa capacità di fornire aggiornamenti frequenti è particolarmente utile per il monitoraggio di cambiamenti ambientali, eventi meteorologici estremi, attività agricole e altri eventi. La risoluzione spaziale dei dati Planet può arrivare fino a 50 centimetri per pixel, consentendo analisi molto più dettagliate rispetto ai dati Sentinel. Planet Labs offre un servizio di abbonamento che consente agli utenti di accedere ai dati e alle immagini satellitari attraverso il loro portale online; pertanto, a differenza dei dati forniti dal portale Copernicus, non sono dati “open source”.
- **World View:** La costellazione World View è composta da 4 satelliti (WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, WorldView-4) ed appartiene a Maxar Technologies, azienda leader nel campo dell'osservazione della Terra. La risoluzione spaziale è variabile in base al tipo di satellite che acquisisce l'immagine, ma in ogni caso rimane sempre nell'ordine dei centimetri per i dati WorldView. La risoluzione spaziale submetrica e la dotazione multispettrale di tali dati li rendono utilizzabili per i cosiddetti servizi di “rapid mapping”, dove

vengono fornite informazioni dettagliate e veloci su eventi catastrofici (alluvioni, incendi, terremoti, fenomeni franosi) usando immagini satellitari. Queste informazioni aiutano a valutare i danni post-evento, coordinare gli interventi di emergenza e supportare la protezione civile.

- **Pleiades:** I dati Pleiades sono forniti dall'omonima costellazione di satelliti, appartenente ad Airbus Defence and Space. I satelliti Pleiades forniscono immagini con una risoluzione spaziale molto elevata, generalmente intorno ai 50 centimetri per pixel. Questo consente di catturare dettagli molto fini sulla superficie terrestre, come edifici, veicoli e oggetti di piccole dimensioni. L'affinità tra le caratteristiche di questi dati e i prodotti WorldView rendono anche i Pleiades idonei alle operazioni di rapid mapping, per identificare le aree colpite da un dato evento calamitoso e fornire supporto alle operazioni di soccorso.

6.1 Individuazione delle aree di interesse

Lo studio è stato svolto avvalendosi di 2 campioni distinti di dati:

- **AOI 1, AOI 2:** le aree inquadrano i comuni di Cellino San Marco (AOI 1) e San Pancrazio Salentino (AOI2). Il territorio è stato analizzato in un servizio di rapid mapping, proprio a causa dell'emergenza fitosanitaria che nel 2015 ha causato un grande focolaio. Il monitoraggio ha segnalato in entrambe le zone la posizione di ulivi contagiati, potati ed eradicati (Figura 6.2, Figura 6.3), tramite il confronto tra dati WorldView acquisiti in data 11/4/2015 e Pleides ottenuti in data 4/5/2015, utilizzati rispettivamente come immagini pre e post evento.
- **AOI 3:** l'area ricade sul comune di Oria, ed è dotata di una serie multitemporale di dati Planet (15/01/2019 – 18/02/2019 – 31/03/2019) per osservare l'evoluzione del contagio di alberi di ulivo.

Le 3 aree di studio sono raffigurate in Figura 6.1.

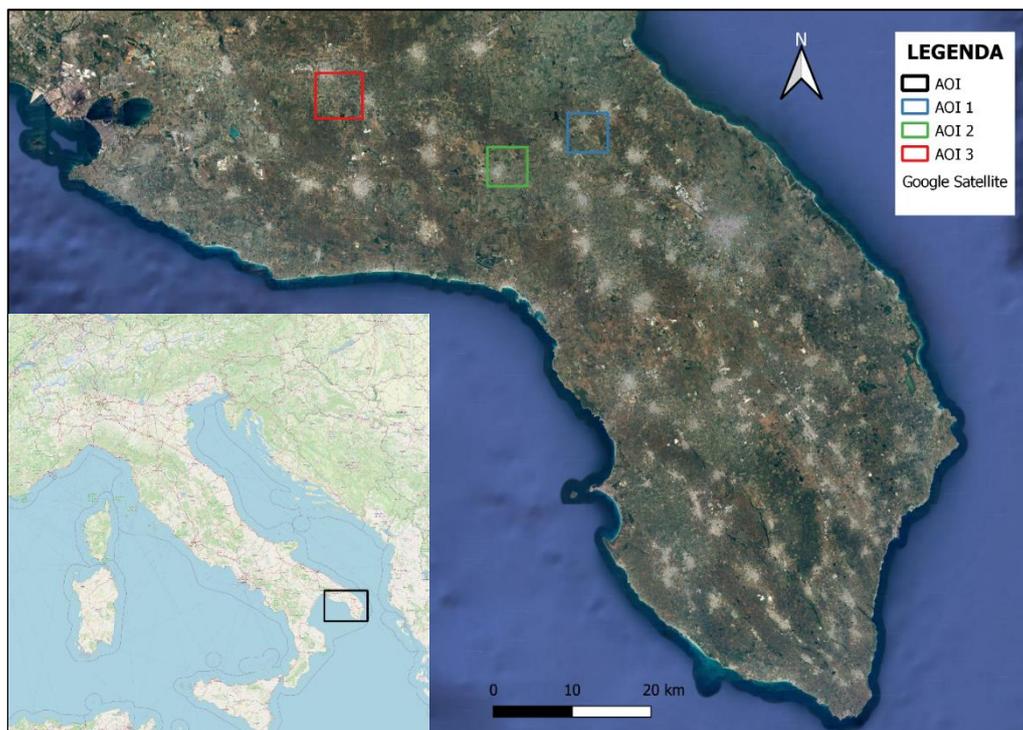


Figura 6.1: Inquadramento delle aree di studio

AOI 1: Cellino San Marco (BRINDISI)

Il territorio comunale, le cui caratteristiche principali sono illustrate nella Tabella 6.1, è stato colpito dal batterio Xylella ad aprile del 2015.

Coordinate	40°28'N 17°58'E
Superficie	37.84 km ²
Altitudine	58 m s.l.m.
Abitanti	6031 (ISTAT 30/06/2023)
Comuni confinanti	Brindisi, Campi Salentina (LE), Guagnano (LE), San Donaci (BR), San Pietro Vernotico (BR), Squinzano (LE)

Tabella 6.1: Sommario Comune di Cellino San Marco (BR)

Il 26 aprile 2015 sono state formalmente pubblicate sul bollettino ufficiale della Regione Puglia le misure fitosanitarie urgenti per il contenimento della diffusione del batterio da quarantena: una sorta di compromesso tra le misure di lotta obbligatoria europee e le disposizioni della Procura di Lecce. Entro il 15 maggio nella zona di contenimento del nord leccese, a Torchiarolo, Cellino San Marco e San Pietro Vernotico, nonché nei focolai puntiformi delle province di Brindisi e Taranto, l'obbligo di "potature severe" sulle piante infette o con evidenti sintomi di disseccamento è stato attuato, prevedendo anche multe e sanzioni per gli inadempienti. Il monitoraggio del contagio, grazie all'attivazione del servizio di rapid mapping, ha registrato il seguente risultato (Figura).

Ad ottobre 2015 ci sono state 4 nuove notifiche di abbattimento di ulivi nel territorio comunale. Secondo quanto stabilito dal piano anti-Xylella, redatto dal commissario straordinario Giuseppe Silletti, sono più di 500 gli alberi che dovrebbero essere eradicati a Cellino San Marco, a fronte di 3 infetti. L'abbattimento degli alberi d'ulivo infettati dalla Xylella e di quelli sani nel raggio di 100 metri ha causato manifestazioni di protesta nel comune di Cellino San Marco e nel comune adiacente di Torchiarolo, con conseguente reimpiantamento degli alberi eradicati precauzionalmente. In quest'area sono stati eseguiti alcuni interventi concreti per la lotta alla Xylella fastidiosa. Ne è un chiaro esempio l'impiantamento di 25 ettari di oliveti, appartenenti ad una varietà non compatibile col batterio, nel mese di giugno del 2019.

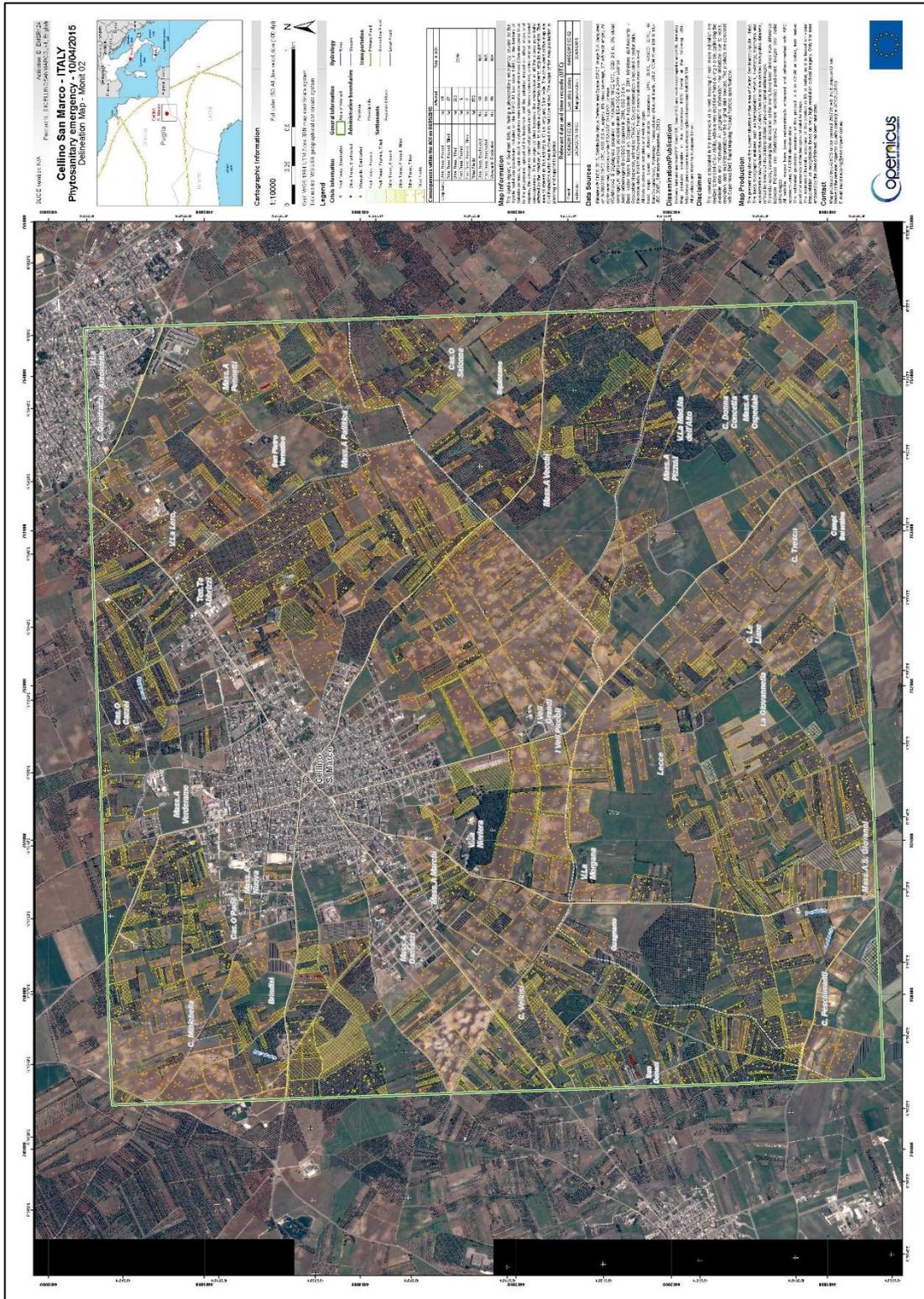


Figura 6.2: Inquadratura del territorio comunale di Cellino San Marco (BR), in seguito all'emergenza fitosanitaria del 2015 (FONTE: https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems-product-component/EMSR124_04CELLINOSANMARCO_DELINEATION_OVERVIEW-MONIT02/4)

AOI 2: San Pancrazio Salentino (BRINDISI)

Il comune, descritto in Tabella 6.2, ha assistito all'emergenza fitosanitaria del batterio *Xylella* nello stesso periodo del comune di Cellino San Marco (AOI 1). È il comune più a sud della provincia e l'unico al confine con le altre due province salentine di Lecce e Taranto.

Coordinate	40°25'N 17°50'E
Superficie	55.93 km ²
Altitudine	62 m s.l.m.
Abitanti	9170 (ISTAT 30/06/2023)
Comuni confinanti	Avetrana (TA), Erchie (BR), Mesagne (BR), San Donaci (BR), Torre Santa Sussanna (BR), Guagnano (LE), Salice Salentino (LE)

Tabella 6.2: Sommario Comune di San Pancrazio Salentino (BR)

San Pancrazio Salentino si trova nella piana brindisina, in prossimità dei confini delle province di Brindisi, Lecce e Taranto. Questa località è distante circa 30 km da Brindisi e dalla costa adriatica, e approssimativamente 26 km da Lecce, con la costa ionica che si trova a soli 10 km di distanza. Il territorio comunale presenta un profilo orografico relativamente uniforme, con altitudini che variano tra i 40 e i 67 metri sul livello del mare. Le attività agricole occupano un'area di circa 33,2 km², con l'olivicoltura che emerge come la coltivazione predominante sia in termini di aziende coinvolte che di superficie coltivata. Essa è seguita dalla coltivazione della vite e del frumento. Le aree boschive sono limitate, occupando soltanto 48 ettari, mentre la superficie totale delle abitazioni residenziali si estende su 41,4 ettari. San Pancrazio Salentino è noto per essere una delle località meno piovose d'Italia. Il suo suolo presenta caratteristiche tipiche delle formazioni carsiche, come pozzi carsici, doline e campi carreggiati. Il principale corso d'acqua è il Canale della Lamia, con caratteristiche stagionali, che funge da punto di scarico per la rete di drenaggio urbano.

A seguito dei focolai situati nel territorio comunale e a Cellino San Marco (AOI 1), con determinazione dirigenziale n. 23/2016 della Sezione Agricoltura sono aggiornate le zone infestate da *Xylella fastidiosa*. I dati catastali sono illustrati nel dettaglio nel Bollettino ufficiale regionale n.16 del 18 febbraio 2016.



Figura 6.3: Inquadramento del territorio comunale di San Pancrazio Salentino (BR), in seguito all'emergenza fitosanitaria del 2015 (FONTE: https://emergency.copernicus.eu/mapping/ems-product-component/EMS124_04CELLINOSANMARCO_DELINEATION_OVERVIEW-MONIT02/4)

AOI 3: Oria (BRINDISI)

Il comune è situato più a nord rispetto alle 2 aree precedentemente illustrate. Oria si trova in cima alle alture di un cordone collinare formato da dune fossili nell'area settentrionale del Salento. Questa posizione elevata le conferisce una vista panoramica dominante sulla pianura salentina circostante. La Tabella 6.3 riporta le caratteristiche generali del territorio comunale.

Coordinate	40°30'N 17°38'E
Superficie	83.67 km ²
Altitudine	166 m s.l.m.
Abitanti	14475 (ISTAT 30/06/2023)
Comuni confinanti	Erchie (BR), Francavilla Fontana (BR), Latiano (BR), Manduria (TA), Mesagne (BR), Torre Santa Sussanna (BR)

Tabella 6.3: Sommario Comune di Oria (BR)

Data la sua posizione affine alle precedenti, la zona ha assistito al contagio da Xylella degli ulivi presenti nel territorio comunale nel medesimo periodo. A marzo 2015 viene scoperto un nuovo focolaio nel territorio comunale, e i primi interventi risalgono ad aprile del 2015, quando il personale dell'Arif, protetto da agenti del corpo forestale dello Stato a causa delle proteste degli ambientalisti, ha abbattuto 7 alberi di ulivo. Questi, a seguito di esami in laboratorio, hanno confermato la presenza del batterio, ma circa 250 alberi limitrofi manifestavano già i primi sintomi da CoDiRO. Le eradicazioni, commissionate dal piano Silletti, riguardavano anche numerose piante nel comune di Veglie, eradicato il giorno successivo ai 7 ulivi di Oria.

A luglio 2015, a seguito di nuove disposizioni europee per il contrasto alla diffusione del batterio e dopo la visita degli ispettori UE in Puglia, è stato pianificato un nuovo intervento di taglio degli ulivi, riguardante 45 alberi e con metodiche diverse per mantenere l'ordine pubblico; la zona è stata interamente transennata per evitarne l'accesso da parte di ambientalisti e manifestanti.

A settembre 2017 sono state effettuate altre eradicazioni: la ditta incaricata si è presentata assieme ai carabinieri forestali nel fondo di un agricoltore che si è opposto con fermezza alla distruzione di una decina di alberi, nonostante il Tar abbia rigettato il suo ricorso.

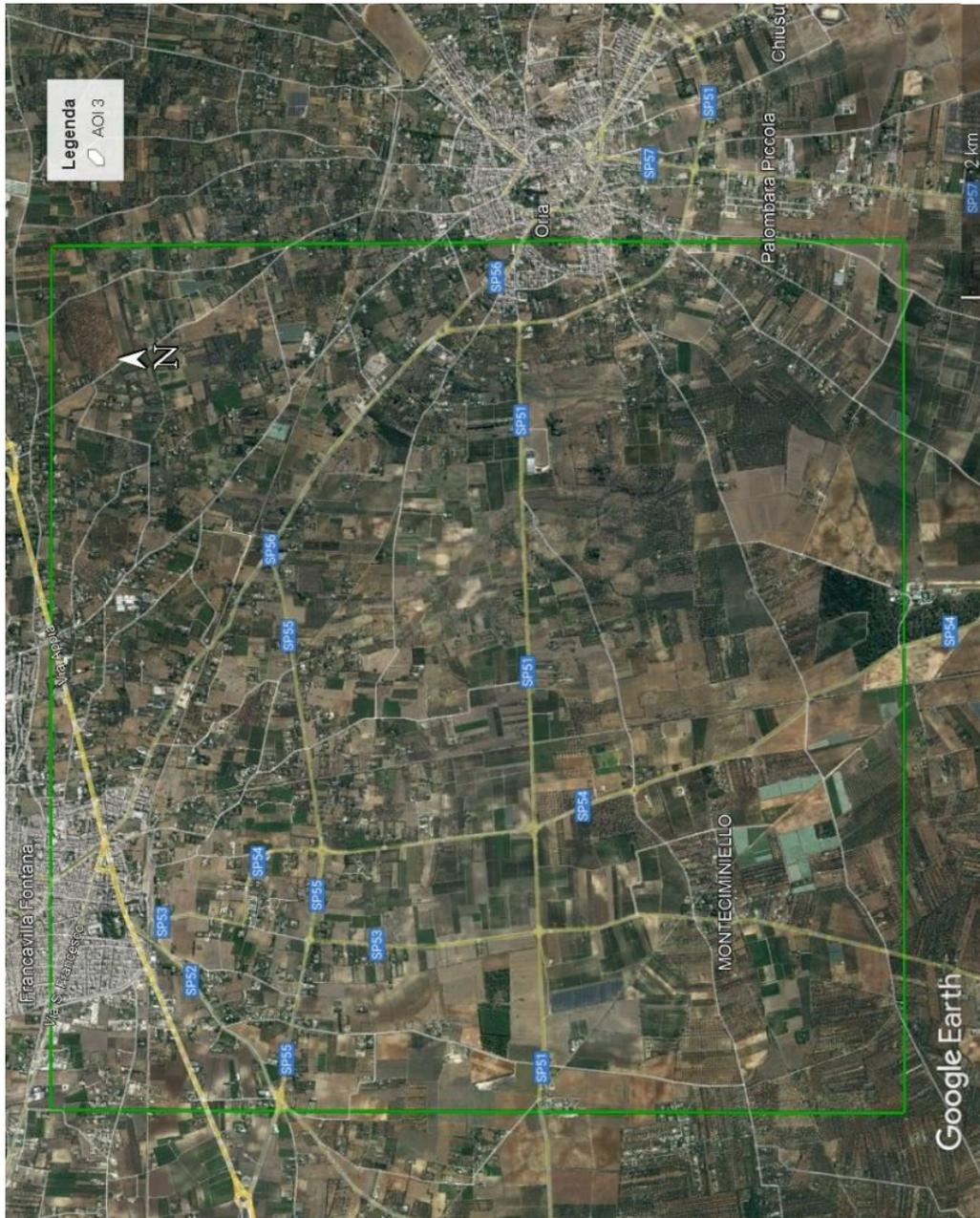


Figura 6.4: Inquadramento del territorio comunale di Oria (BR) (FONTE: Google Earth)

6.2 Caratteristiche dei datasets

Come detto precedentemente, per ognuna delle 3 aree di interesse sono stati impiegati diverse tipologie di dati satellitari. Ai files multispettrali vengono apportate apposite calibrazioni, in base al sistema di acquisizione dal quale provengono. Di seguito (Tabella 6.4, Tabella 6.5, Tabella 6.6) vengono riportate le specifiche tecniche delle bande spettrali per ogni varietà di dato utilizzato, riportando l'intervallo di lunghezza d'onda (λ) per ciascuna banda:

BAND	BAND INTERVAL
Coastal Blue	431 – 452 nm
Blue	465 – 515 nm
Green I	513 – 549 nm
Green	547 – 583 nm
Yellow	600 – 620 nm
Red	650 – 680 nm
RedEdge	697 – 713 nm
NIR	845 – 885 nm

Tabella 6.4: Intervalli di lunghezza d'onda per ogni banda per i dati PlanetScope (FONTE: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/planetscope>)

BAND	BAND INTERVAL
Coastal Blue	400 – 450 nm
Blue	450 – 510 nm
Green	510 – 580 nm
Yellow	585 – 625 nm
Red	630 – 690 nm
Red edge	705 – 745 nm
NIR1	770 – 895 nm
NIR2	860 – 1040 nm

Tabella 6.5: Intervalli di lunghezza d'onda per ogni banda per i dati WorldView2 (FONTE: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/worldview-2>)

BAND	BAND INTERVAL
Blue	450 – 530 nm
Green	510 – 590 nm
Red	620 – 700 nm
NIR	775 – 915 nm

Tabella 6.6: Intervalli di lunghezza d'onda per ogni banda per i dati Pleiades (FONTE: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/pleiades>)

Le bande dei dati sopra citati vengono combinate per fornire le stesse immagini aeree in diverse versioni:

- **Immagini RGB:** queste tipologie di dati, note anche come “immagini a colori reali”, utilizzano le tre bande del visibile (rosso, verde, blu) per rappresentare l’area raffigurata esattamente come se fosse vista ad occhio nudo. Ad esempio, l’acqua appare blu, le foreste verdi e le superfici urbane mostrano una varietà di colori realistici. I diversi impieghi di questo tipo di immagine riguardano monitoraggio ambientale, geologico e altre tipologie cartografiche che richiedono una rappresentazione reali dei colori per interpretare l’immagine.
- **Immagini CIR:** a differenza delle immagini RGB, le immagini in falso colore mostrano colori che non corrispondono direttamente ai colori reali dell’area rappresentata. Le aree vegetate appaiono in diverse tonalità di rosso in base al loro stato di salute, alla copertura del suolo, all’umidità e altri fattori che nelle immagini RGB non sono evidenti, o comunque facilmente deducibili. Le aree urbanizzate invece vengono rappresentate con diverse tonalità di ciano, che nello schema dei colori RGB è il complementare del rosso; questo fattore discriminante, nelle immagini CIR, rappresenta il principale indicatore dell’assenza di vegetazione nelle aree con quelle tonalità.

6.3 Metodologie impiegate in fase di analisi

Un aspetto assolutamente non trascurabile che riguarda gli strumenti di misura, e quindi anche i sensori, è la capacità di garantire misure che possono essere confrontate nel tempo, cioè misure che presentano valori assoluti e riferimenti di calibrazione stabili, con un funzionamento strumentale che rimane invariato. Durante la fase di acquisizione, le immagini satellitari presentano distorsioni geometriche e radiometriche causate dal sistema di rilevamento (piattaforma e sensore), dall'atmosfera attraverso cui il segnale viaggia, dall'angolo di osservazione e persino dall'influenza della curvatura terrestre. Questi difetti variano in base al tipo di immagine e alla sua risoluzione, e possono compromettere l'uso appropriato delle immagini in applicazioni cartografiche.

Il termine "pre-elaborazione" si riferisce a un insieme di procedure e metodi finalizzati a correggere i difetti e le problematiche presenti nelle immagini "grezza" appena acquisite. Questi processi, che precedono l'effettivo utilizzo dei dati telerilevati, sono essenziali per consentire agli utenti di sfruttare appieno il contenuto informativo dei dati. È importante sottolineare che la necessità di eseguire diverse operazioni di correzione delle immagini dipende dall'uso specifico a cui sono destinati questi dati. Le correzioni apportate alle immagini telerilevate possono essere suddivise in due categorie principali:

- **Correzione o calibrazione radiometrica:** questa tipologia di correzione mira a eliminare le distorsioni nel segnale dovute a varie influenze esterne al momento dell'acquisizione (atmosfera, illuminazione, topografia), nonché i possibili malfunzionamenti dei sensori. Questo processo include anche la calibrazione dei sensori stessi per garantire che forniscano misurazioni accurate;
- **correzione geometrica:** questa pre-elaborazione riguarda l'eliminazione di deformazioni spaziali nell'immagine, sia di natura sistematica (dovute alla curvatura e alla rotazione terrestre) che non sistematica (variazioni di quota, velocità, orientamento della piattaforma e distorsioni relative al sensore) introdotte durante il processo di acquisizione.

Quando si acquisisce un'immagine, è necessario scegliere il livello di pre-elaborazione desiderato. Di solito, le correzioni radiometriche e le correzioni geometriche sistematiche vengono eseguite dal fornitore prima del rilascio delle immagini. Tuttavia, i diversi livelli di correzione per le distorsioni geometriche non sistematiche determineranno il tipo di prodotto finale a disposizione dell'utente. Nel caso specifico dei dati utilizzati in questo studio, per quanto riguarda le correzioni di tipo geometrico non è risultato necessario correggere alcune imperfezioni, in quanto ritenute trascurabili. Le AOI 1 e 2, fornite di dati WorldView2 e Pleiades, evidenziano una sovrapposibilità non perfetta tra i due raster, in particolare per oggetti sopraelevati rispetto al piano campagna (chiome di alberi, tetti di edifici) a causa delle orbite distinte dei due diversi satelliti, mentre i dati Pleiades di cui dispone l'AOI 3 risultano essere perfettamente sovrapposibili. Per nessuno dei dati a disposizione (WorldView, Pleiades e Planet) è stata effettuata una calibrazione radiometrica, poiché a tutti i raster forniti per lo studio è stata eseguita una calibrazione "Bottom of the Atmosphere" (BOA). Tale procedura è essenziale risulta essenziale perché l'atmosfera può assorbire, diffondere o alterare la luce e altre radiazioni che vengono rilevate dai sensori a bordo dei satelliti. Il termine "bottom of the atmosphere" indica che la calibrazione tiene conto dell'interazione della luce o delle radiazioni con l'atmosfera fino alla superficie terrestre, ottenendo immagini nelle quali ad ogni pixel è associato il valore della radianza del suolo. Per radianza si intende la quantità di radiazione elettromagnetica che raggiunge il sensore satellitare da una determinata area della superficie terrestre.

Le immagini a disposizione sono state impiegate per produrre un dataset, per ogni data di acquisizione, contenente gli indici vegetativi (*si veda il cap. 4.3*). Questi indici sono stati preventivamente calcolati, per ogni data di acquisizione, tramite il software ENVI. Tramite l'apposito tool "Spectral Indices" (Figura 6.5) vengono calcolati separatamente tutti gli indici che il software supporta, in base al numero di bande che l'immagine in input ha a disposizione. Ad esempio, nel caso di dati WorldView, PlanetScope e Pleiades l'NDMI non apparirà nell'elenco degli indici vegetativi calcolabili, in quanto richiede la banda SWIR che non è presente nei suddetti dati.

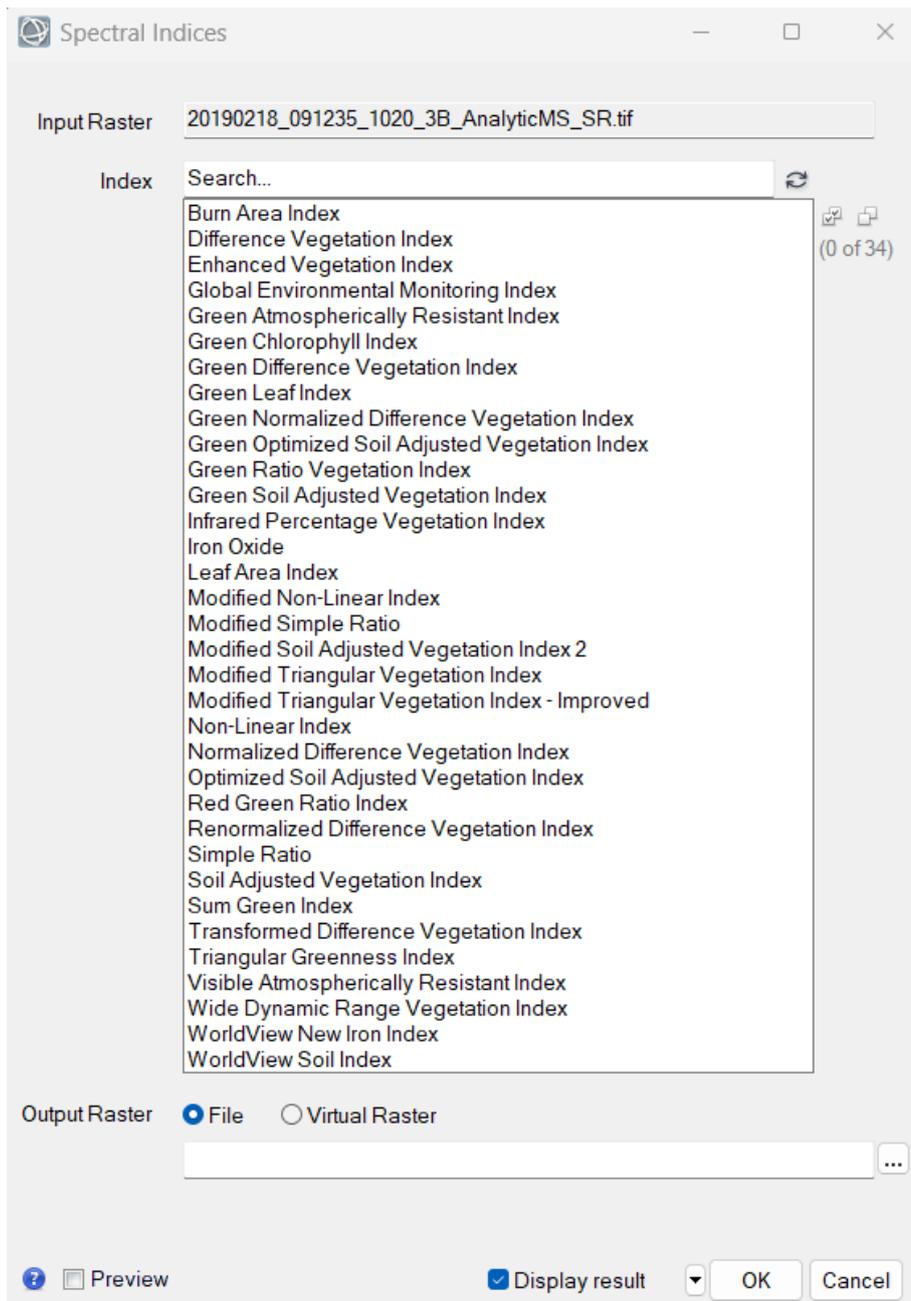


Figura 6.5: Strumento "Spectral Indices" per il calcolo degli indici vegetativi

Come risultato verrà prodotto un output per ogni indice calcolato. Questi dati spaiati verranno raggruppati formando dei datasets tramite il tool "Build Layer Stack" presente nel software ENVI (Figura 6.6), generando un raster multispettrale dove ciascun raster presente nell'elenco di input ne diventa una banda spettrale.

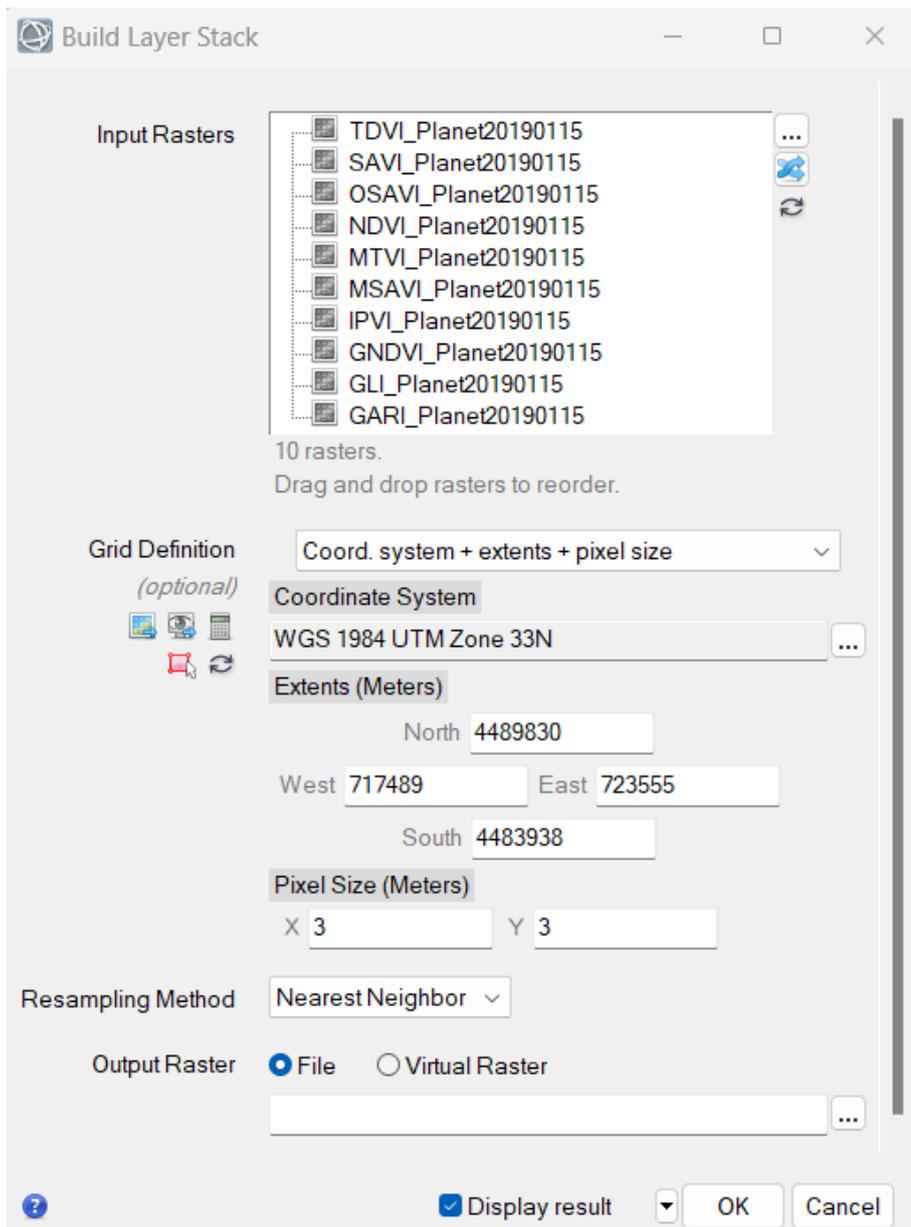


Figura 6.6: Strumento "Build Layer Stack" per la creazione del dataset di indici vegetativi

Ciascun dataset prodotto conterrà tutti gli indici calcolati dallo specifico dato di partenza. Su ogni stack di indici vegetativi vengono tracciate le seguenti ROI (Region of Interest):

- **Permanent areas:** queste aree sono state tracciate su aree dove, tramite un'analisi visiva, si ha certezza che l'uso del suolo non è cambiato col tempo. Sono stati scelti tetti di edifici, aree asfaltate e altri elementi antropici dei quali si ha certezza della loro integrità nel tempo, per analizzare la variazione

temporale degli indici vegetativi per confrontarla con quella relativa ad alberi contagiati da Xylella.

- **Trees:** le ROI tracciate su questi elementi inquadrano il singolo albero che, tramite fotointerpretazione delle immagini a disposizione, mostra sintomi chiari e visivi di CoDiRO. Sono stati scelti appositamente alberi che, nelle immagini pre-evento, presentavano una chioma folta e verde, mentre nelle immagini post-evento risultano praticamente spogli.
- **Variable areas:** queste zone sono localizzate attorno alle ROI che evidenziano il singolo albero, espandendo l'analisi di change detection agli alberi adiacenti in modo tale da valutare anche l'influenza del suolo sottostante gli alberi sulla variazione degli indici vegetativi.

Per avere una stima affidabile, bisogna fare in modo che, per ogni AOI, le Region of Interest abbiano la stessa posizione ed estensione, includendo i medesimi pixel per ogni raster contenente gli stack di indici vegetativi. Questa condizione viene facilmente rispettata nel caso in cui tutti i raster siano correttamente georeferenziati, in modo tale da renderli perfettamente sovrapponibili; in questo caso è sufficiente tracciare manualmente le ROI, per ogni area di studio (AOI 1, AOI 2, AOI 3), sul primo raster per poi importare le stesse geometrie sulle altre immagini, in modo tale da avere a disposizione un trend multitemporale di indici vegetativi relativi ad aree identiche in ogni singolo pixel. Come già accennato precedentemente (*si veda il cap. 6.2*), le AOI 1 e 2 non sono perfettamente sovrapponibili, ma tale criticità non compromette i risultati finali, in quanto le 3 tipologie di ROI sono state tracciate in modo tale da intersecare la porzione degli elementi in comune tra i 2 raster.

7. Analisi dei risultati

Per ogni AOI è stato valutato inizialmente il trend dei 10 indici vegetativi selezionati (GARI, GLI, GNDVI, IPVI, MSAVI, MTVI, NDVI, OSAVI, SAVI, TDVI) per le ‘Permanent Areas’, per avere dei range di riferimento che assicurano l’immutabilità del suolo nel tempo. Questi valori, estratti dalle ROIs saranno il fattore discriminante che assicura la sintomatologia degli olivi.

AOI 1

Le Figure 7.1, 7.2, 7.3 illustrano le aree che, tramite fotointerpretazione, risultano identiche nelle immagini pre evento (WorldView – 11/04/2015) e post evento (Pleiades – 04/05/2015). Ciò si deduce grazie alla natura antropica di tali aree, in quanto riguardano, così come per le altre AOIs, superfici urbanizzate come tetti di edifici o strade asfaltate.



Figura 7.1: ‘Permanent Area’ (poligono rosso) tracciata sul tetto di un’abitazione



Figura 7.2: 'Permanent Area' (poligono rosso) tracciata su un parcheggio asfaltato



Figura 7.3: 'Permanent Area' (poligono rosso) tracciata sul tetto di un edificio

Su ogni ROI, tramite il comando “Statistics”, è possibile estrarre i valori di tutti gli indici vegetativi per ogni pixel. Il confronto tra le immagini pre e post evento sulle ‘Permanent Area’ viene illustrato nelle Figure 7.4, 7.5, 7.6.

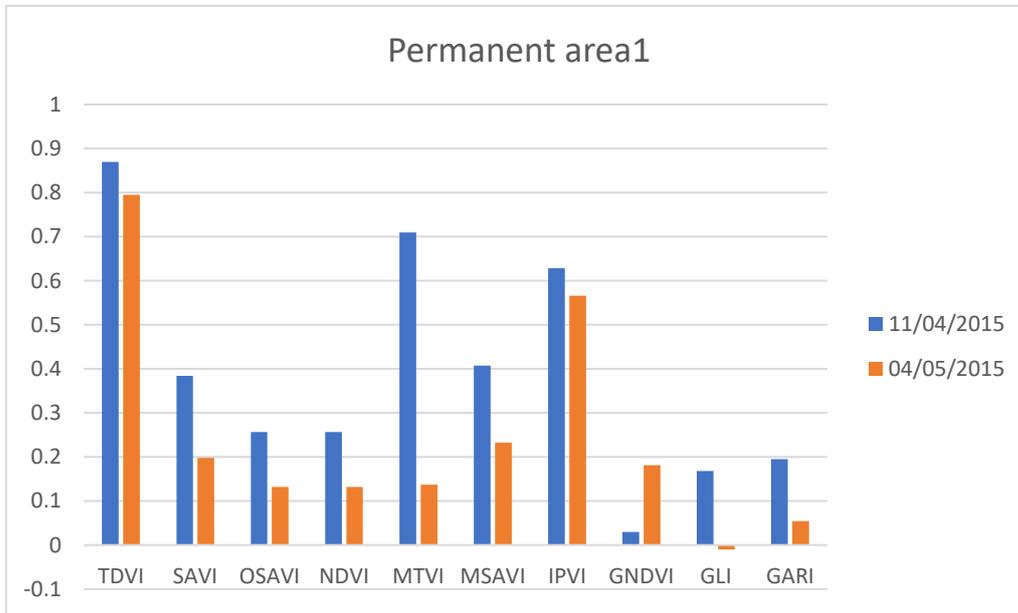


Figura 7.4: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 1 (Figura 7.1)

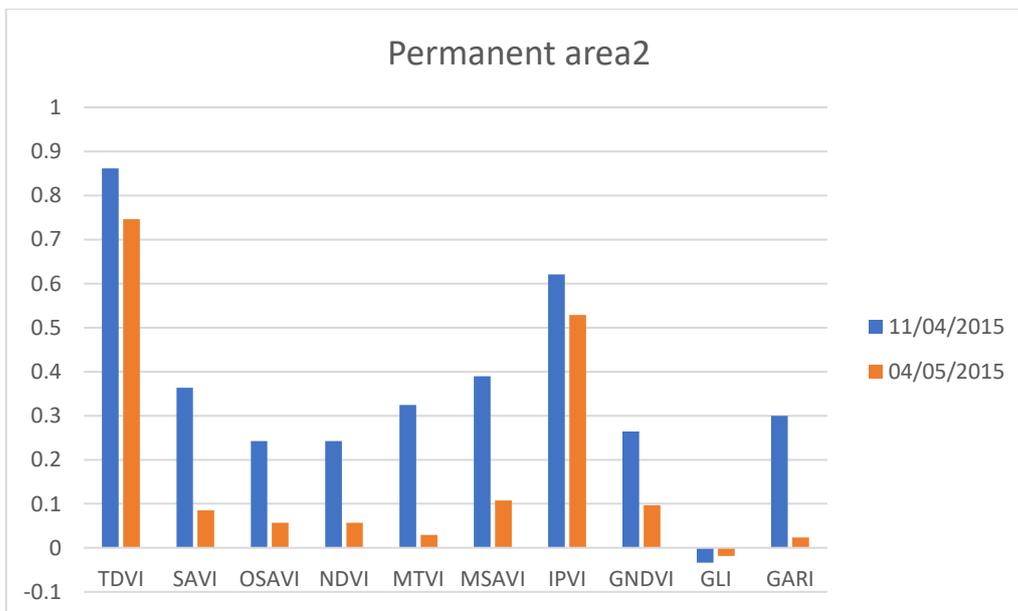


Figura 7.5: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 2 (Figura 7.2)

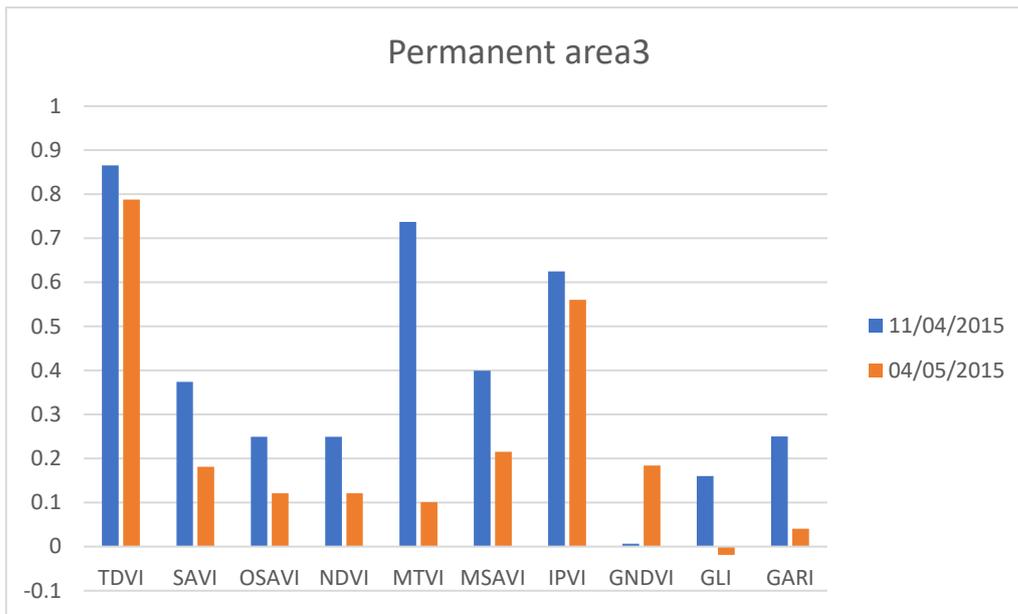


Figura 7.6: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 3 (Figura 7.3)

I grafici riportano, per ciascuna ‘Permanent area’, il valor medio di ogni indice vegetativo, in quanto le ROIs in questione risultano essere abbastanza omogenee. Le deviazioni standard di ogni indice vegetativo risultano essere abbastanza ridotte, e ciò rende il valor medio di ogni indice rappresentativo per la ROI corrispondente.

Dai risultati ottenuti si evince una chiara incompatibilità riguardo l’indice MTVI, il quale differisce di una quantità non trascurabile. Per superfici antropiche ci si dovrebbe aspettare valori molto simili, pertanto si ritiene necessario considerare tale indice non idoneo come indicatore dello stato di salute della vegetazione.

Successivamente sono stati analizzati i trend degli indici per ROIs che comprendono la chioma di alberi che risultano contagiati dal batterio Xylella. Questo cambiamento è deducibile tramite fotointerpretazione, osservando alberi che nelle immagini WorldView (pre-evento) presentano una chioma folta e verde, mentre nell’immagine Pleiades (post-evento) appaiono parzialmente o totalmente privi di chioma. Per avere la certezza che gli alberi individuati dalle ROIs sono stati effettivamente infettati, l’ispezione visiva sul software ENVI è stata sempre affiancata da documentazione che certifichi la presenza del batterio negli oliveti, e in alcuni casi tramite Street view (nel caso in cui l’albero sia

sufficientemente vicino alla rete stradale) per avere una visione del singolo olivo quasi alla pari di un'ispezione in situ.

Dall'iniziale confronto tra le immagini in “false color” (CIR), ottenute mediante la combinazione delle bande del vicino infrarosso (NIR), del rosso e del verde, emerge chiaramente la disparità nello stato vegetativo degli oliveti nelle due aree. Il colore rosso, attribuibile alla presenza della banda NIR, indica la presenza di copertura vegetale. In conformità alle aspettative, il rosso appare più vivido e intenso nel mese di aprile 2015, quando il processo iniziale di disseccamento consentiva alle foglie di mantenere una maggiore quantità di clorofilla, riflettendo così più intensamente la luce nell'infrarosso (Figure 7.7, 7.8, 7.9).

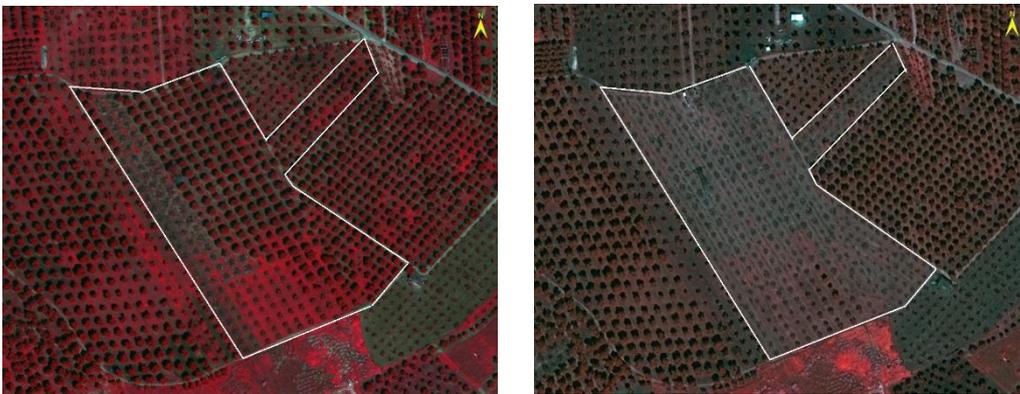


Figura 7.7: Confronto immagini CIR 11/04/2015 (sx) e 04/05/2015 (dx)



Figura 7.8: Confronto immagini CIR 11/04/2015 (sx) e 04/05/2015 (dx)

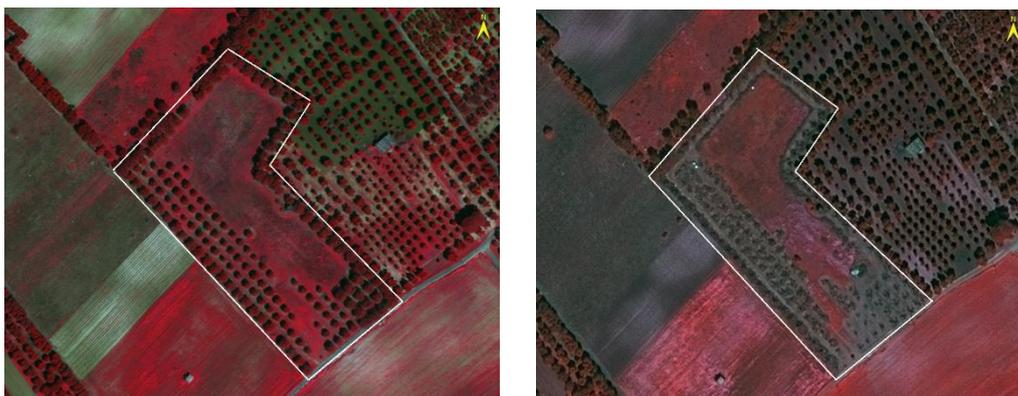


Figura 7.9: Confronto immagini CIR 11/04/2015 (sx) e 04/05/2015 (dx)

Per ogni oliveto raffigurato nelle Figure 7.7, 7.8, 7.9 è stato selezionato un singolo albero, tramite la ROI 'Tree'. La comparazione tra le immagini pre e post evento sui 'Trees' viene illustrato nelle Figure 7.10, 7.11, 7.12.

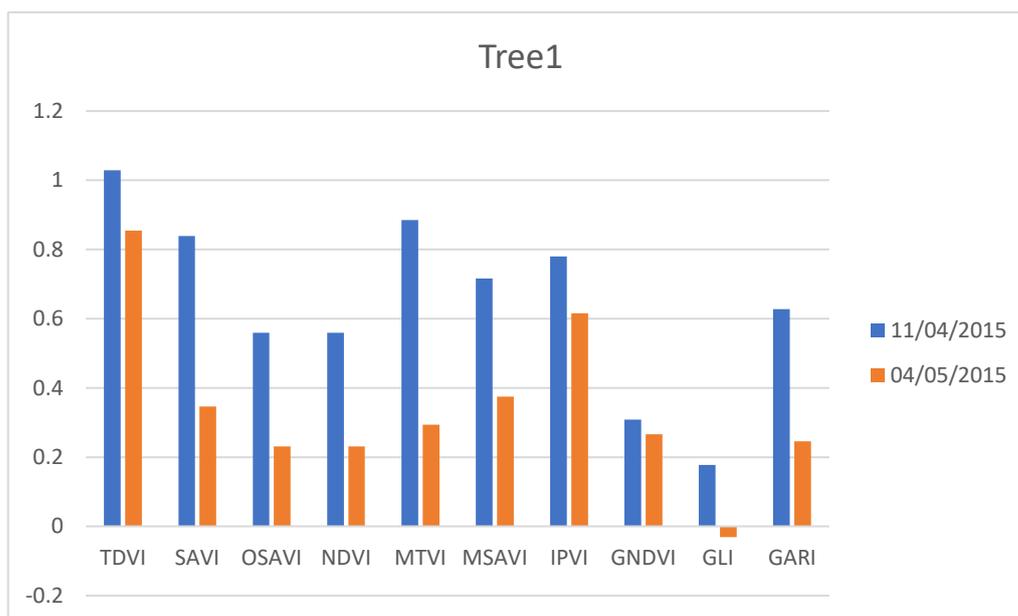


Figura 7.10: confronto tra gli indici vegetativi per il 'Tree1', appartenente al primo oliveto (Figura 7.7)

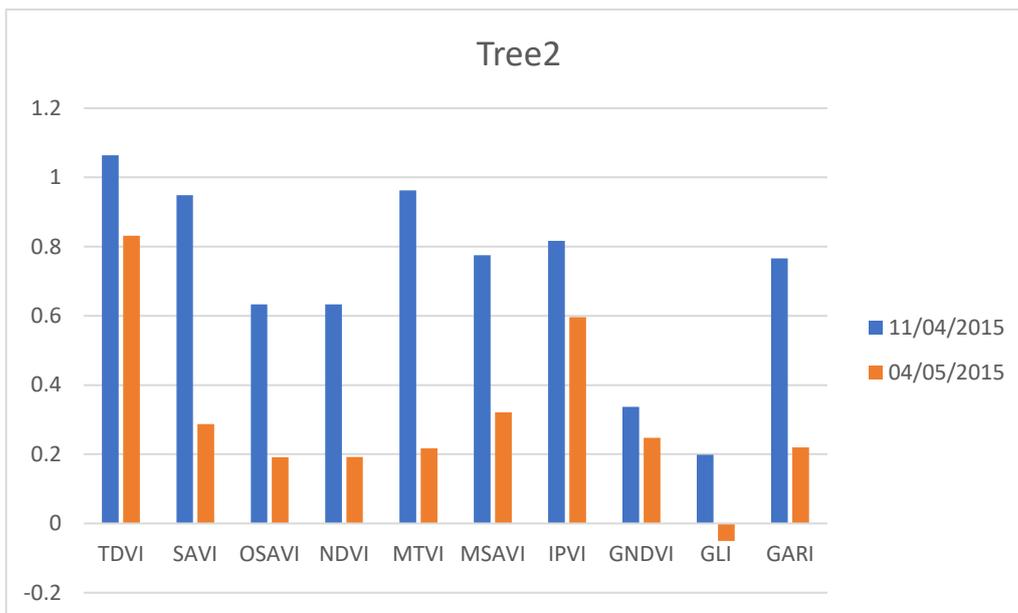


Figura 7.11: confronto tra gli indici vegetativi per il 'Tree2', appartenente al secondo oliveto (Figura 7.8)

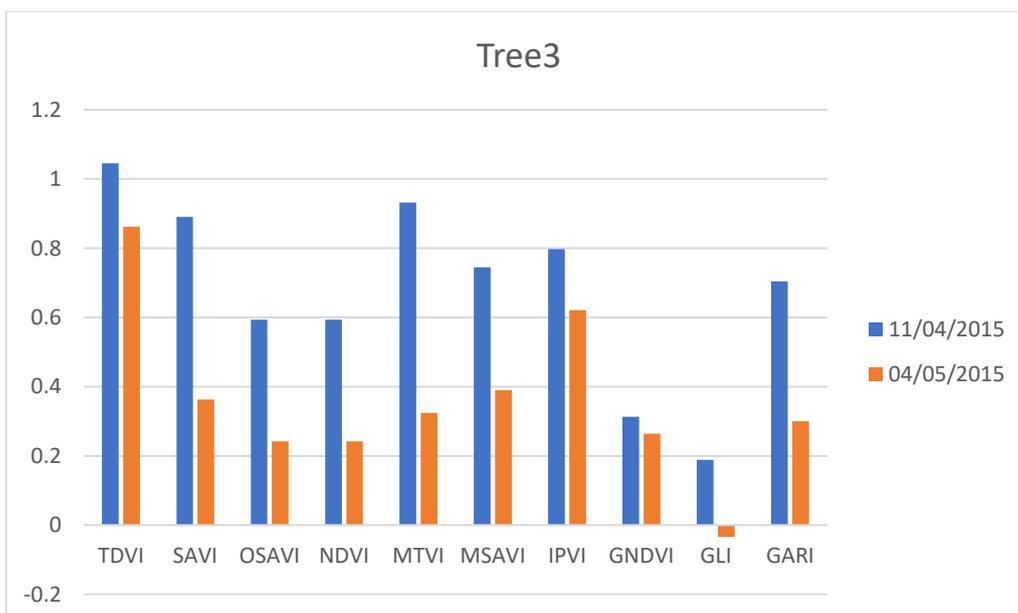


Figura 7.12: confronto tra gli indici vegetativi per il 'Tree3', appartenente al terzo oliveto (Figura 7.9)

Per avere una stima quantitativa della precisione di ciascun indice come indicatore dello stato di salute degli olivi, la Tabella 7.1 indica gli scarti, per ogni 'Permanent area' e per ogni 'Tree', tra gli indici nell'immagine di pre e post evento.

	Permanent area1	Permanent area2	Permanent area3	Tree1	Tree2	Tree3	media Permanent areas	media Trees
Δ TDVI	0,075	0,115	0,078	0,174	0,233	0,184	0,089	0,197
Δ SAVI	0,187	0,278	0,193	0,493	0,661	0,527	0,219	0,560
Δ OSAVI	0,124	0,185	0,129	0,329	0,441	0,352	0,146	0,374
Δ NDVI	0,125	0,185	0,129	0,329	0,441	0,352	0,146	0,374
Δ MTVI	0,572	0,295	0,636	0,592	0,746	0,608	0,501	0,649
Δ MSAVI	0,175	0,282	0,184	0,341	0,453	0,355	0,214	0,383
Δ IPVI	0,062	0,093	0,064	0,164	0,221	0,176	0,073	0,187
Δ GNDVI	0,152	0,167	0,177	0,042	0,089	0,049	0,165	0,060
Δ GLI	0,179	0,015	0,179	0,208	0,249	0,222	0,124	0,226
Δ GARI	0,140	0,277	0,209	0,382	0,546	0,404	0,209	0,444

Tabella 7.1: Sintesi dell'analisi delle ROIs

alla Tabella 7.1 si evince che, oltre all'indice MTVI scartato a causa della scarsa affidabilità riscontrata nell'analisi delle 'Permanent areas', ci sono altri IV (TDVI, MSAVI, IPVI, GNDVI, GLI) che non mettono sufficientemente in evidenza il cambio dello stato di salute degli olivi. Essi infatti presentano uno scarto medio di circa 0.1 nelle 'Permanent areas', risultando quindi abbastanza stabili; tuttavia, nel caso dei 'Trees', la variazione di questi indici non si discosta molto da quella riscontrata nelle 'Permanent areas', pertanto una loro variazione entro un certo range non può essere attribuita in maniera univoca ad un contagio da Xylella dell'albero in esame. I restanti indici (SAVI, OSAVI, NDVI, GARI) risultano pertanto i più affidabili alla valutazione dello stato di salute degli alberi di olivo nell'AOI 1, poiché gli scarti tra gli indici delle immagini pre e post evento risultano essere nettamente più grandi nel caso dei 'Trees' rispetto alle 'Permanent areas'.

È stata valutata infine l'influenza del suolo vegetato attorno ai singoli alberi tramite le 'Variable areas', per testare l'affidabilità degli indici vegetativi per analisi a scala di olivo. La Tabella 7.2 illustra il confronto tra i valori medi degli scarti tra gli IV dei 'Trees', illustrati precedentemente, e quelli relativi alle 'Variable areas'.

	media Variable areas	media Trees
Δ TDVI	0.145	0.197
Δ SAVI	0.409	0.560
Δ OSAVI	0.273	0.374
Δ NDVI	0.273	0.374
Δ MTVI	0.592	0.649
Δ MSAVI	0.286	0.383
Δ IPVI	0.137	0.187
Δ GNDVI	0.032	0.060
Δ GLI	0.219	0.226
Δ GARI	0.331	0.444

Tabella 7.2: confronto dei risultati tra 'Trees' e 'Variable areas'

I risultati ottenuti non evidenziano sostanziali differenze tra ‘Trees’ e ‘Variable areas’. Queste ultime avranno ovviamente una deviazione standard maggiore rispetto alle aree che includono esclusivamente la chioma degli alberi, ma comunque sufficientemente contenuta per considerare significativo il valor medio per ogni IV. Il confronto tra le standard deviations, per ogni acquisizione, dei dati WorldView e dei dati Pleiades, è riportato nelle Tabelle 7.3 e 7.4.

	Tree1	Variable area 1	Tree2	Variable area 2	Tree3	Variable area 3
TDVI	0,0230	0,0613	0,0086	0,0526	0,0074	0,0451
SAVI	0,0706	0,1809	0,0276	0,1585	0,0230	0,1354
OSAVI	0,0471	0,1206	0,0184	0,1057	0,0153	0,0903
NDVI	0,0471	0,1206	0,0184	0,1057	0,0153	0,0903
MTVI	0,0497	0,1165	0,0193	0,1133	0,0240	0,0839
MSAVI	0,0391	0,1127	0,0138	0,0932	0,0122	0,0804
IPVI	0,0236	0,0603	0,0092	0,0529	0,0077	0,0451
GNDVI	0,0385	0,1360	0,0167	0,1041	0,0163	0,1043
GLI	0,0127	0,0170	0,0059	0,0196	0,0066	0,0152
GARI	0,0901	0,2065	0,0387	0,2238	0,0450	0,1595

Tabella 7.3: confronto delle std tra ‘Trees’ e ‘Variable areas’ per i dati WorldView (11/04/2015)

	Tree1	Variable area 1	Tree2	Variable area 2	Tree3	Variable area 3
TDVI	0,0022	0,0078	0,0015	0,0119	0,0025	0,0061
SAVI	0,0056	0,0204	0,0038	0,0299	0,0064	0,0158
OSAVI	0,0037	0,0136	0,0025	0,0199	0,0043	0,0105
NDVI	0,0037	0,0136	0,0025	0,0199	0,0043	0,0105
MTVI	0,0051	0,0206	0,0049	0,0343	0,0082	0,0178
MSAVI	0,0049	0,0174	0,0035	0,0275	0,0056	0,0136
IPVI	0,0019	0,0068	0,0013	0,0100	0,0021	0,0053
GNDVI	0,0040	0,0117	0,0032	0,0153	0,0022	0,0077
GLI	0,0022	0,0031	0,0022	0,0066	0,0025	0,0030
GARI	0,0082	0,0244	0,0038	0,0532	0,0162	0,0225

Tabella 7.4: confronto delle std tra ‘Trees’ e ‘Variable areas’ per i dati Pleiades (04/05/2015)

AOI 2

Questa Area of Interest risulta quasi identica alla precedente, data la tipologia dei dati satellitari e la loro rispettiva data di acquisizione:

- Immagine pre-evento: WorldView (11/04/2015);
- immagine post-evento: Pleiades (04/05/2015).

La metodologia adottata risulta pertanto simile a quella adoperata per l'AOI 1, analizzando gli indici vegetativi di un campione di 'Permanent areas' composto da 3 aree di riferimento (Figure 7.13, 7.14, 7.15).



Figura 7.13: 'Permanent Area' (poligono rosso) tracciata su un'area asfaltata



Figura 7.14: 'Permanent Area' (poligono rosso) tracciata sul tetto di un edificio



Figura 7.15: 'Permanent Area' (poligono rosso) tracciata sul tetto di un edificio

Il confronto tra gli indici vegetativi per tali aree è riportato in Figura 7.16, 7.17, 7.18.

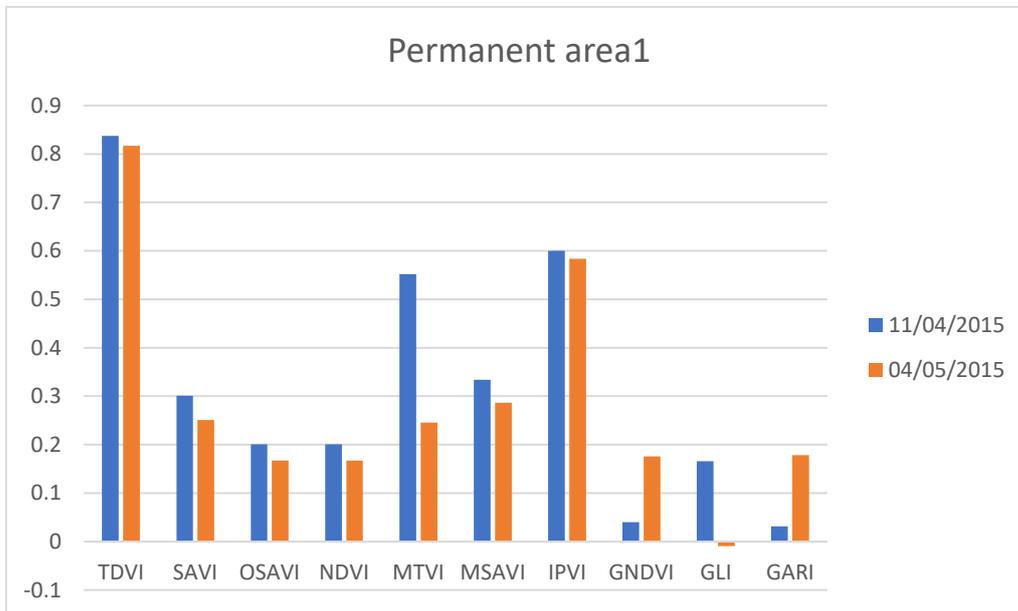


Figura 7.16: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 3 (Figura 7.13)

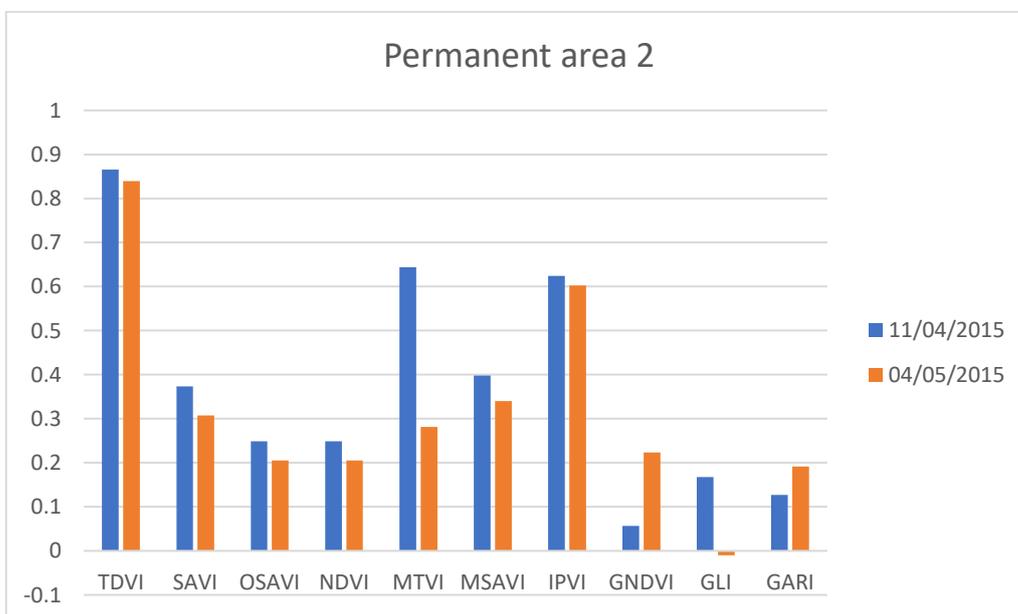


Figura 7.17: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 3 (Figura 7.14)

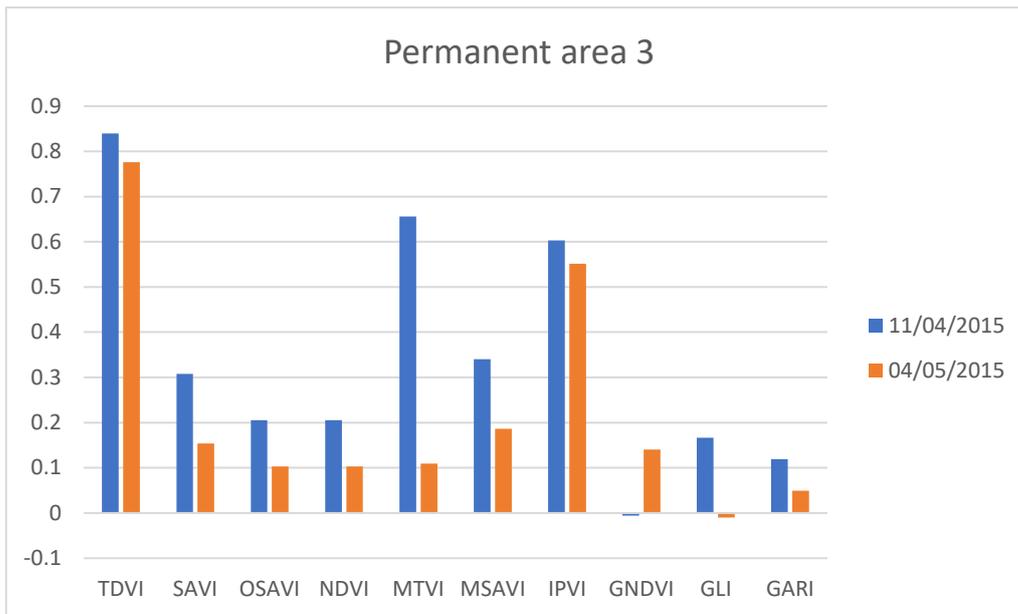


Figura 7.18: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 3 (Figura 7.15)

In conformità con la precedente AOI, i grafici evidenziano una netta incompatibilità sull'indice MTVI, risultando pertanto inadatto per confronti di questo tipo tra dati WorldView e dati Planet. Sono stati valutati successivamente i trend degli IV riguardo i 'Trees', riportati in Figura 7.19, 7.20, 7.21. Essi sono stati preventivamente analizzati, come con la precedente AOI, tramite immagini CIR per verificare l'effettivo cambio di stato vegetativo tra le due immagini.

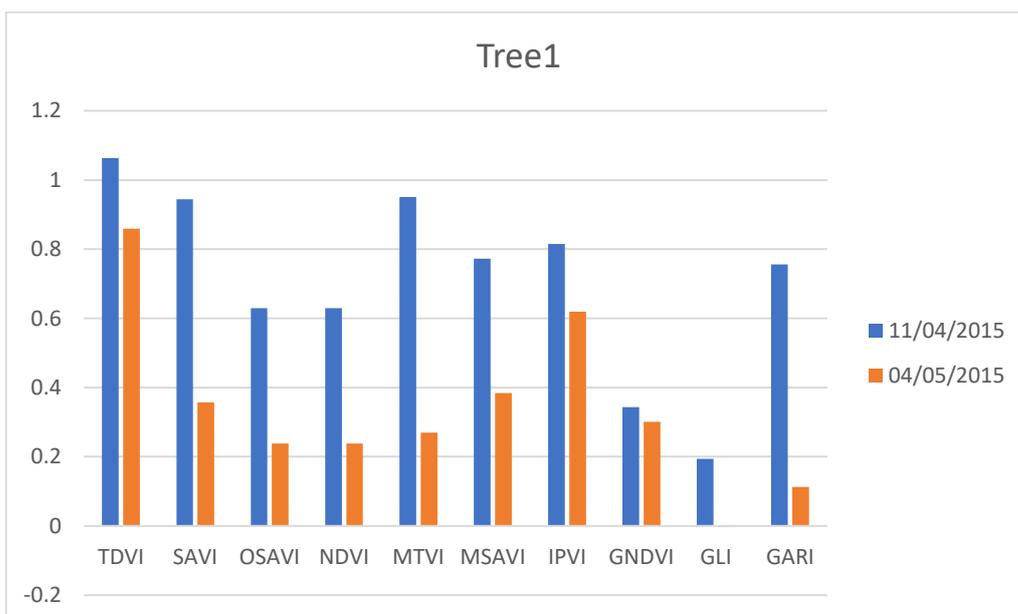


Figura 7.19: Confronto tra gli indici vegetativi per il primo campione di 'Tree'

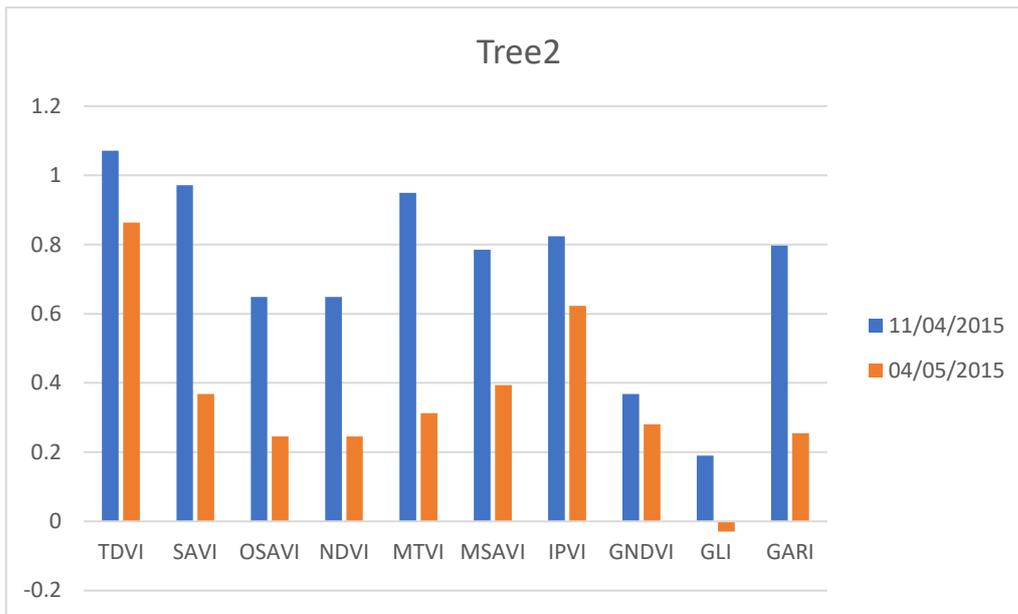


Figura 7.20: Confronto tra gli indici vegetativi per il secondo campione di 'Tree'

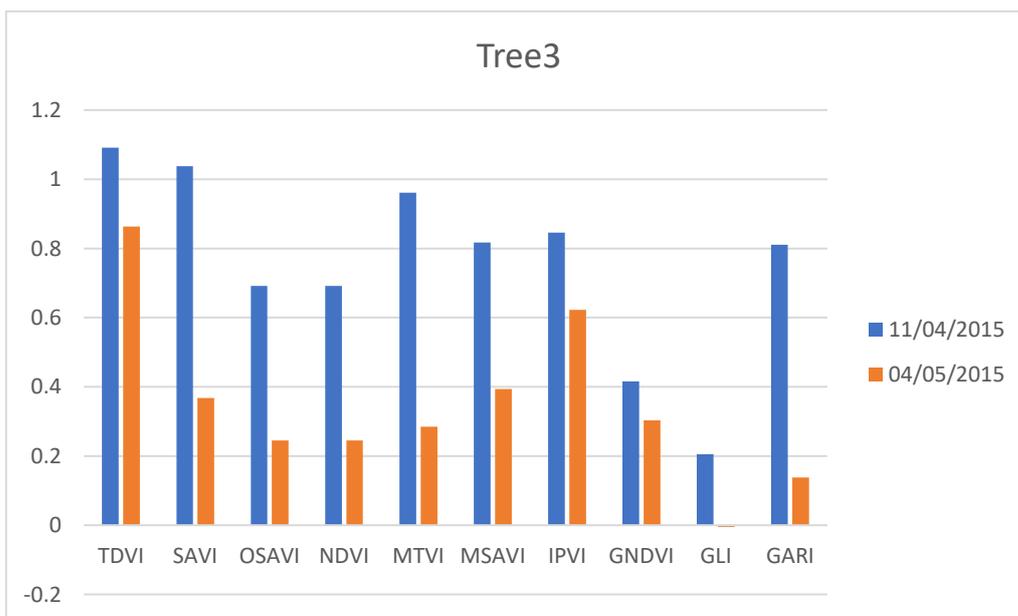


Figura 7.21: Confronto tra gli indici vegetativi per il terzo campione di 'Tree'

La Tabella 7.5 illustra la sintesi dei risultati ottenuti dal confronto degli IV tra le immagini pre e post evento, plottata nei precedenti grafici.

	Permanent area1	Permanent area2	Permanent area3	Tree1	Tree2	Tree3	media Permanent areas	media Trees
Δ TDVI	0,020	0,026	0,064	0,204	0,208	0,228	0,037	0,213
Δ SAVI	0,050	0,066	0,154	0,587	0,603	0,670	0,090	0,620
Δ OSAVI	0,033	0,044	0,103	0,392	0,403	0,447	0,060	0,414
Δ NDVI	0,033	0,044	0,103	0,392	0,403	0,447	0,060	0,414
Δ MTVI	0,306	0,362	0,547	0,681	0,637	0,676	0,405	0,665
Δ MSAVI	0,048	0,058	0,154	0,388	0,391	0,424	0,087	0,401
Δ IPVI	0,017	0,022	0,051	0,196	0,201	0,223	0,030	0,207
Δ GNDVI	0,136	0,167	0,147	0,043	0,087	0,112	0,150	0,081
Δ GLI	0,175	0,178	0,177	0,195	0,220	0,211	0,176	0,209
Δ GARI	0,147	0,064	0,070	0,644	0,543	0,673	0,094	0,620

Tabella 7.5: Sintesi dell'analisi delle ROIs

Dai risultati ottenuti si evince che, oltre all'indice MTVI, anche il GNDVI ed il GLI non sono abbastanza precisi per essere impiegati come discriminante per riconoscere la presenza del batterio negli alberi analizzati. Ne consegue che gli indici TDVI, SAVI, OSAVI, NDVI, MSAVI, IPVI, GARI, ciascuno con un diverso livello di sensibilità, valutano lo stato di salute degli olivi con un buon livello di precisione.

L'influenza del suolo attorno agli alberi analizzati, analogamente con lo svolgimento della precedente AOI, è stata valutata confrontando il valor medio degli scarti tra gli IV nelle 'Variable areas' con gli stessi valori, relative ai 'Trees' riportati in Tabella 7.5. La Tabella 7.6 riporta i risultati di tale confronto.

	media Variable areas	media Trees
Δ TDVI	0,170	0,213
Δ SAVI	0,488	0,620
Δ OSAVI	0,326	0,414
Δ NDVI	0,326	0,414
Δ MTVI	0,634	0,665
Δ MSAVI	0,326	0,401
Δ IPVI	0,163	0,207
Δ GNDVI	0,046	0,081
Δ GLI	0,200	0,209
Δ GARI	0,528	0,620

Tabella 7.6: confronto dei risultati tra 'Trees' e 'Variable areas'

Le differenze tra le due ROIs sono molto simili a quelle riscontrate nella precedente Area of Interest. La deviazione standard delle variable areas risulta ovviamente maggiore, considerando l'eterogeneità del suolo che comprende (chioma dell'albero e suolo circostante), ma comunque abbastanza contenuta per considerare validi i valori medi riportati. Le Tabelle 7.7 e 7.8 illustrano i valori di deviazione standard per i 'Trees' e per le 'Variable areas'.

	Tree1	Variable area 1	Tree2	Variable area 2	Tree3	Variable area 3
TDVI	0.0068	0.0546	0.0251	0.0435	0.0147	0.0399
SAVI	0.0217	0.1631	0.0806	0.1361	0.0479	0.1232
OSAVI	0.0145	0.1087	0.0538	0.0907	0.0319	0.0822
NDVI	0.0145	0.1087	0.0538	0.0907	0.0320	0.0822
MTVI	0.0225	0.0849	0.0592	0.0712	0.0252	0.0580
MSAVI	0.0109	0.0984	0.0398	0.0724	0.0226	0.0679
IPVI	0.0072	0.0544	0.0269	0.0454	0.0160	0.0411
GNDVI	0.0215	0.1365	0.0333	0.0982	0.0294	0.0959
GLI	0.0051	0.0134	0.0149	0.0160	0.0147	0.0161
GARI	0.0457	0.1804	0.1475	0.1649	0.0978	0.1579

Tabella 7.7: confronto delle std tra 'Trees' e 'Variable areas' per i dati WorldView (11/04/2015)

	Tree1	Variable area 1	Tree2	Variable area 2	Tree3	Variable area 3
TDVI	0.0073	0.0109	0.0035	0.0138	0.0064	0.0195
SAVI	0.0189	0.0283	0.0090	0.0359	0.0165	0.0515
OSAVI	0.0126	0.0189	0.0060	0.0239	0.0110	0.0343
NDVI	0.0126	0.0189	0.0060	0.0239	0.0110	0.0343
MTVI	0.0220	0.0331	0.0082	0.0320	0.0214	0.0516
MSAVI	0.0165	0.0243	0.0078	0.0306	0.0141	0.0423
IPVI	0.0063	0.0094	0.0030	0.0120	0.0055	0.0172
GNDVI	0.0078	0.0128	0.0058	0.0221	0.0070	0.0269
GLI	0.0046	0.0057	0.0017	0.0066	0.0031	0.0072
GARI	0.0306	0.0360	0.0054	0.0142	0.0211	0.0447

Tabella 7.8: confronto delle std tra 'Trees' e 'Variable areas' per i dati Pleiades (04/05/2015)

AOI 3

Questa AOI, come già anticipato precedentemente, presenta importanti differenze rispetto alle altre 2, in base alla tipologia ed alla quantità di dati a disposizione. Essi infatti comprendono 3 immagini Planet, con un intervallo di acquisizione di circa un mese (15/01/2019 – 18/02/2019 – 31/03/2019). La procedura rimane tuttavia la stessa, con un'analisi preliminare sulle 'Permanent areas', illustrata nelle Figure 7.22, 7.23, 7.24.

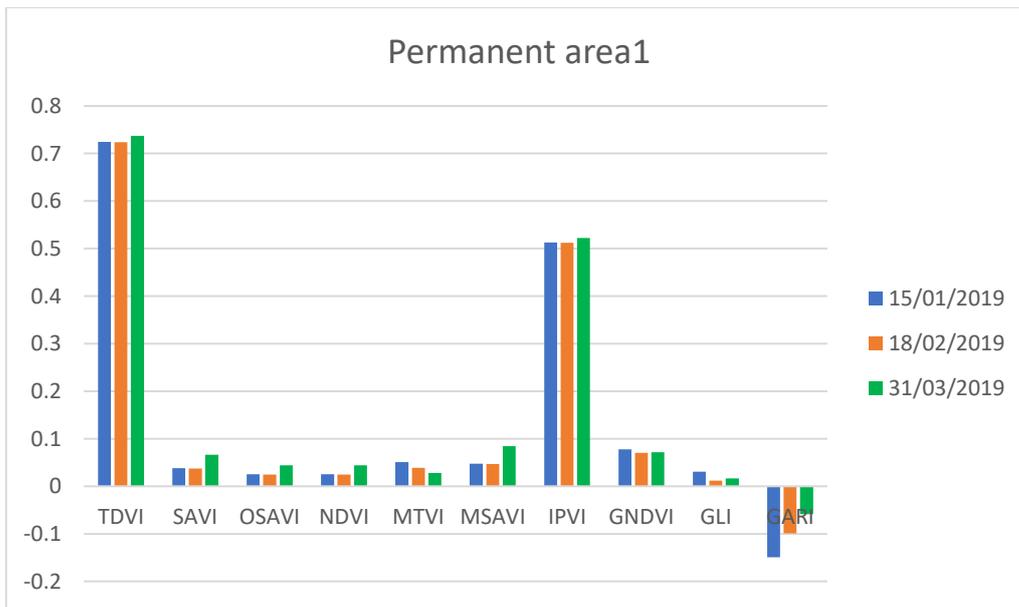


Figura 7.22: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 1

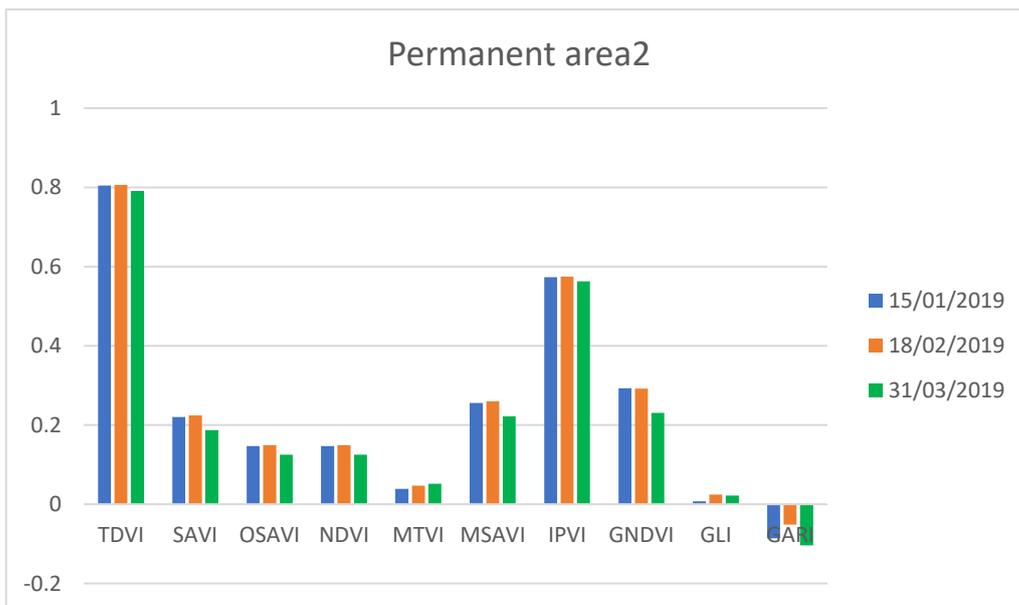


Figura 7.23: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 2

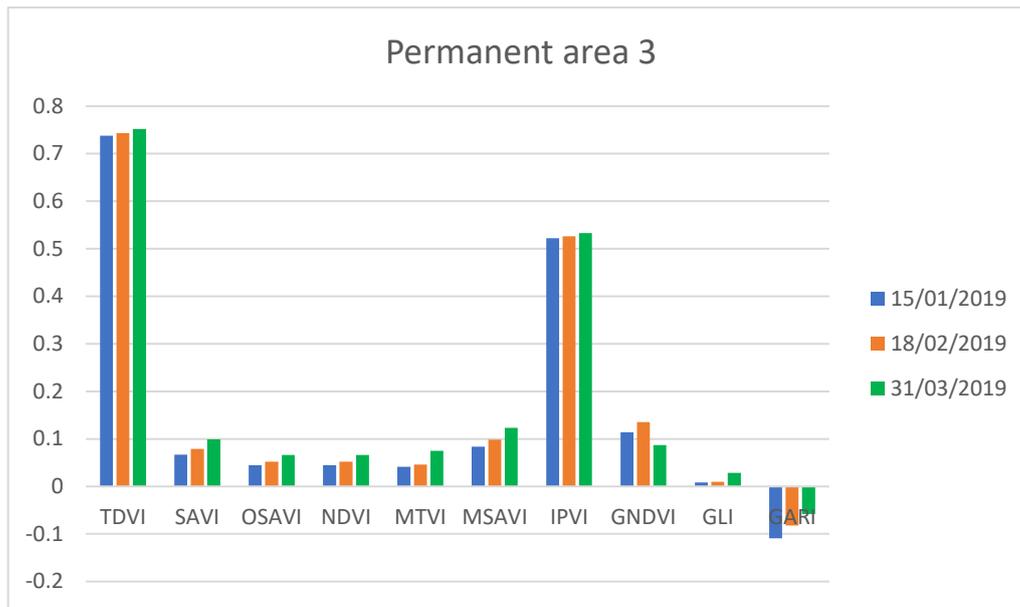


Figura 7.24: Confronto tra gli indici vegetativi per la Permanent area 3

In questo caso, tutti gli selezionati rimangono stabili, pertanto risulta opportuno non escludere nessuno di essi a priori per la valutazione dei ‘Trees’. Essi, a differenza delle precedent AOIs, presentano una deviazione standard nulla, in quanto hanno l’estensione di un pixel e pertanto restituiscono un singolo valore per ogni IV. Questo perché i dati Planet hanno una risoluzione spaziale di 3 metri (a differenza dei dati Pleiades e WorldView, dove è pari a 0.5 m), che consente di visualizzare i singoli olivi come elementi puntuali. I risultati ottenuti dai ‘Trees’ sono stati poi confrontati con quelli delle ‘Variable areas’, come mostrato in Figura 7.25, 7.26, 7.27.

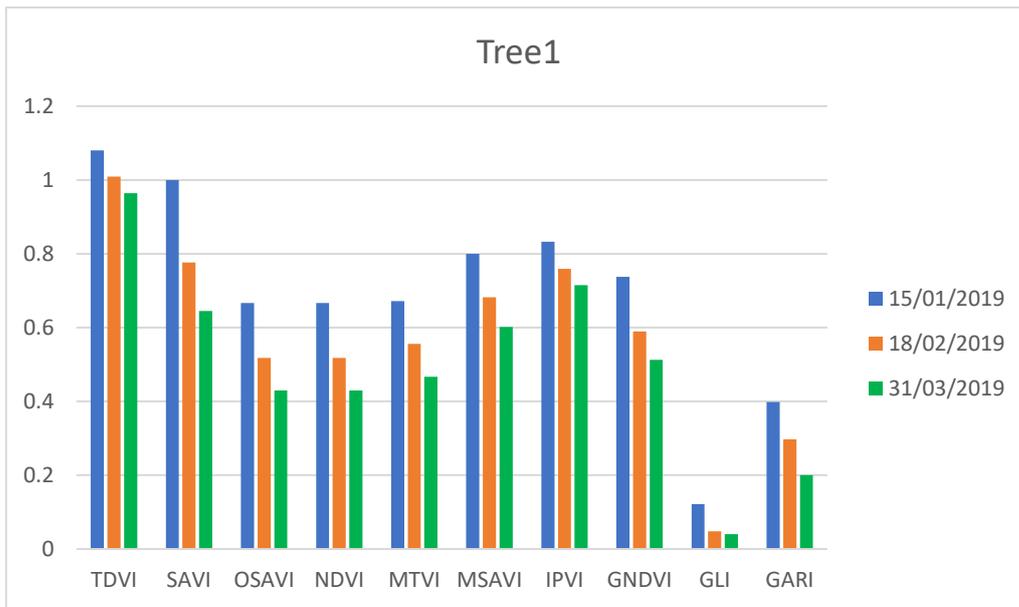


Figura 7.25: Confronto tra gli indici vegetativi per il primo campione di 'Tree'

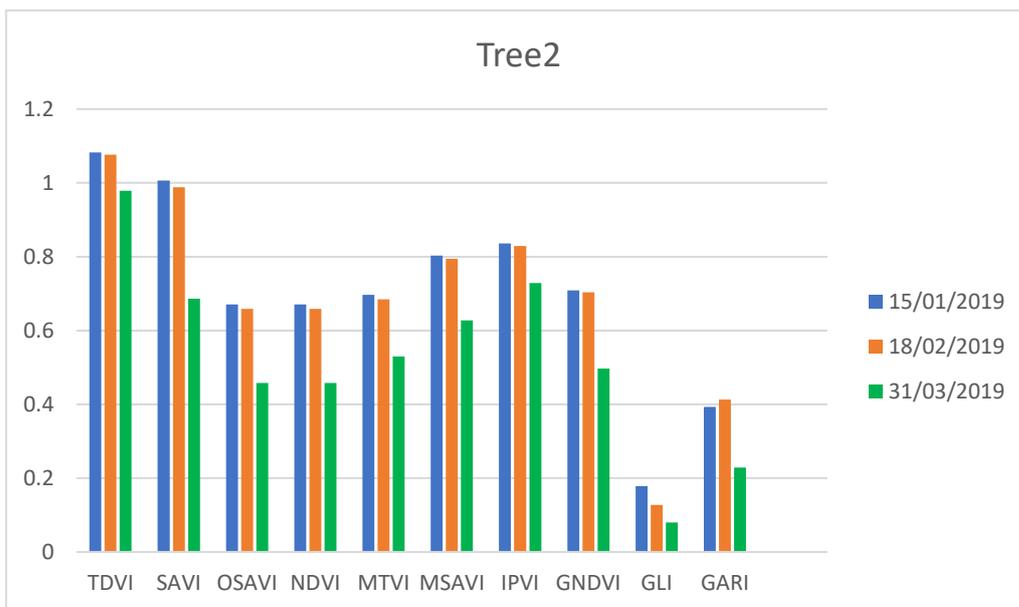


Figura 7.26: Confronto tra gli indici vegetativi per il secondo campione di 'Tree'

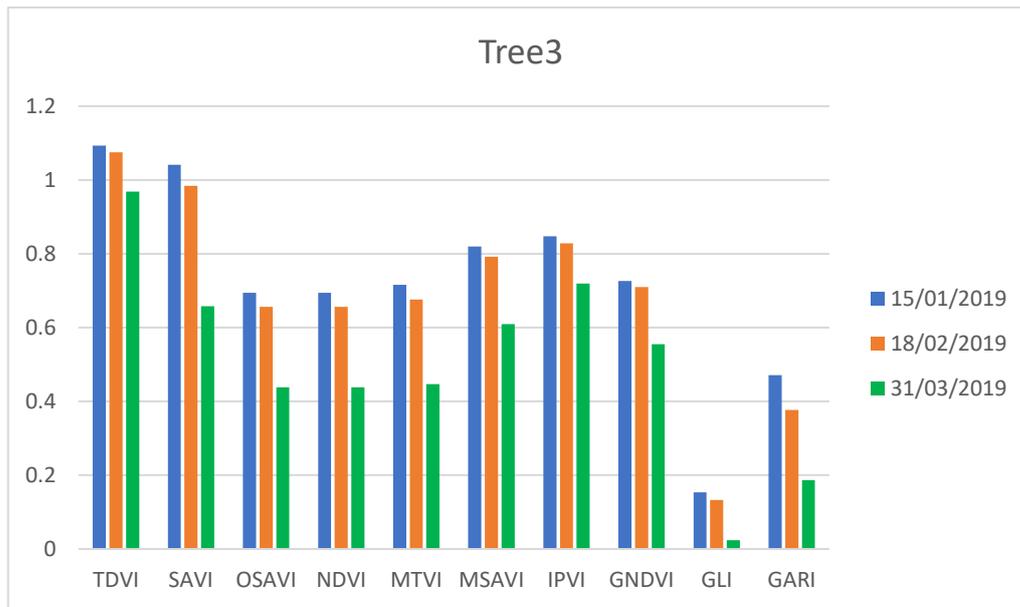


Figura 7.27: Confronto tra gli indici vegetativi per il terzo campione di 'Tree'

I risultati ottenuti confermano che tutti gli indici hanno una buona risposta all'analisi di change detection effettuata, in quanto il loro trend risulta essere diverso mostrando un gradiente maggiore a quello riscontrato nelle Figure 7.22, 7.23, 7.24. Anche la maggiore consistenza dei dati consente un'analisi più accurata, osservando una costante diminuzione degli IV (corrispondente ad una riduzione della componente vegetativa del suolo). Le Tabelle 7.9 e 7.10 illustrano il confronto tra i valori esatti per ogni indice riguardo il singolo pixel ('Trees') e le 'Variable areas' sviluppate attorno ad essi, includendo quindi gli alberi adiacenti ed il terreno tra di essi.

	TREE 1			TREE 2			TREE 3		
	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019
TDVI	1,080	1,009	0,964	1,082	1,077	0,979	1,093	1,075	0,969
SAVI	0,999	0,777	0,645	1,006	0,988	0,686	1,041	0,984	0,658
OSAVI	0,666	0,518	0,430	0,671	0,659	0,458	0,694	0,656	0,439
NDVI	0,666	0,518	0,430	0,671	0,659	0,458	0,694	0,656	0,439
MTVI	0,672	0,556	0,467	0,697	0,684	0,530	0,716	0,676	0,447
MSAVI	0,800	0,682	0,601	0,803	0,794	0,628	0,819	0,792	0,610
IPVI	0,833	0,759	0,715	0,836	0,829	0,729	0,847	0,828	0,719
GNDVI	0,738	0,590	0,513	0,709	0,704	0,497	0,726	0,710	0,555
GLI	0,122	0,048	0,040	0,178	0,127	0,080	0,154	0,133	0,024
GARI	0,399	0,297	0,200	0,393	0,413	0,229	0,471	0,377	0,186

Tabella 7.9: Sintesi dell'analisi degli IV per i 'Trees'

	Variable area 1			Variable area 2			Variable area 3		
	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019
TDVI	1,058	1,015	0,961	1,056	1,080	0,982	1,072	1,087	0,958
SAVI	0,929	0,794	0,636	0,999	0,924	0,698	1,022	0,974	0,627
OSAVI	0,620	0,530	0,424	0,666	0,616	0,465	0,682	0,649	0,418
NDVI	0,620	0,530	0,424	0,666	0,616	0,465	0,682	0,649	0,418
MTVI	0,637	0,569	0,465	0,691	0,648	0,531	0,704	0,669	0,438
MSAVI	0,765	0,692	0,593	0,799	0,762	0,634	0,811	0,787	0,588
IPVI	0,810	0,765	0,712	0,833	0,808	0,733	0,841	0,825	0,709
GNDVI	0,692	0,598	0,498	0,708	0,669	0,511	0,720	0,706	0,517
GLI	0,114	0,060	0,056	0,151	0,125	0,072	0,139	0,121	0,036
GARI	0,344	0,300	0,184	0,428	0,326	0,241	0,458	0,378	0,174

Tabella 7.10: Valori medi degli IV per le 'Variable areas'

Le 'Variable areas', anche in questo caso, non si discostano molto dal singolo pixel attorno al quale sono state tracciate, presentando dunque un trend che ha, per ogni indice e per ogni data, il valor medio mostrato in Tabella 7.10 ed una deviazione standard compresa tra 0.01 e 0.04 (Tabella 7.11).

	Variable area 1			Variable area 2			Variable area 3		
	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019	15/01/2019	18/02/2019	31/03/2019
TDVI	0,0134	0,0081	0,0280	0,0104	0,0037	0,0152	0,0114	0,0071	0,0281
SAVI	0,0425	0,0247	0,0822	0,0332	0,0119	0,0449	0,0365	0,0232	0,0808
OSAVI	0,0284	0,0164	0,0548	0,0221	0,0079	0,0300	0,0243	0,0155	0,0539
NDVI	0,0284	0,0164	0,0548	0,0221	0,0079	0,0300	0,0243	0,0155	0,0539
MTVI	0,0245	0,0165	0,0756	0,0211	0,0082	0,0405	0,0227	0,0151	0,0758
MSAVI	0,0217	0,0141	0,0516	0,0167	0,0057	0,0275	0,0180	0,0110	0,0535
IPVI	0,0142	0,0082	0,0274	0,0111	0,0040	0,0150	0,0122	0,0077	0,0269
GNDVI	0,0272	0,0142	0,0296	0,0165	0,0074	0,0175	0,0200	0,0097	0,0342
GLI	0,0246	0,0108	0,0301	0,0188	0,0121	0,0200	0,0269	0,0180	0,0278
GARI	0,0325	0,0169	0,0641	0,0288	0,0125	0,0332	0,0386	0,0251	0,0624

Tabella 7.11: Valori della deviazione standard degli IV per le 'Variable areas'

8. Conclusioni

Il presente lavoro mira a fornire, tramite l'analisi degli Indici di Vegetazione, un'analisi della diffusione del batterio tramite change detection che permetta di avere risultati comparabili a quelli riscontrati nelle analisi menzionate nel Capitolo 5, nonostante la diversa quantità e tipologia di dati a disposizione.

L'obiettivo principale di tale analisi multitemporale consiste nell'osservare il gradiente degli IV, in funzione del tempo, degli olivi contagiati da *Xylella* e di confrontarlo con superfici di riferimento, scelte in base alla loro immutabilità nel tempo. Sono state individuate 3 aree di interesse in base alla fornitura di dati satellitari.

Il primo campione di dati comprende due immagini (pre e post evento) acquisite dai satelliti WorldView e Pleiades, rispettivamente in data 11/04/2015 e in data 04/05/2015. Questi rasters sono stati impiegati per un servizio di rapid mapping, a causa della medesima emergenza fitosanitaria, i cui risultati sono disponibili sul sito Emergency Copernicus. Questi dati sono stati impiegati per le prime due AOI, valutando la diminuzione fogliare in base al trend dei seguenti Indici di Vegetazione:

- AOI 1: SAVI, OSAVI, NDVI, GARI;
- AOI 2: TDVI, SAVI, OSAVI, NDVI, MSAVI, IPVI, GARI.

La terza AOI, è stata analizzata tramite dati acquisiti dal satellite Planet. Il sito in esame si distingue grazie alla serie di dati più consistente, comprendendo 3 immagini (15/01/2019 – 18/02/2019 – 31/03/2019) che permettono di ricostruire in maniera più precisa, tramite la stessa procedura adottata nelle AOI precedenti, la risposta degli olivi al contagio da *Xylella*. I dati Planet si sono rivelati particolarmente idonei per tale scopo, nonostante abbiano una risoluzione geometrica nettamente inferiore ai dati WorldView e Pleiades, in quanto i 10 indici selezionati per questa analisi presentano un trend decrescente nel caso degli alberi da olivo, che è un chiaro sintomo di riduzione di superficie vegetate attribuita alla sintomatologia da *Xylella*.

Sulla base delle analisi computazionali condotte, dei risultati ottenuti e dei riscontri raccolti, è possibile affermare con sicurezza la validità dell'approccio adottato attraverso il calcolo degli Indici di Vegetazione SAVI, OSAVI, NDVI, GARI nel caso di dati WorldView e Pleiades, e di GARI, GLI, GNDVI, IPVI, MSAVI, MTVI, NDVI, OSAVI, SAVI, TDVI nel caso di dati Planet, ai fini del monitoraggio degli effetti della malattia sin dallo stadio presintomatico/iniziale.

I risultati ottenuti consentono inoltre di valutare quale risoluzione (geometrica, temporale) dei dati a disposizione risulta migliore per monitorare tale fenomeno. Lo studio condotto sulle prime due AOIs ha evidenziato che il confronto tra dati di diversa natura può comportare criticità riguardanti gli Indici di Vegetazione (alcuni di essi non presentano una stabilità sufficiente nelle analisi per essere considerati degli affidabili indicatori dello stato di salute degli olivi) e di natura geometrica (le orbite diverse dei satelliti WorldView e Pleiades non garantiscono una perfetta sovrapposibilità dei rasters, in particolare per gli elementi che si elevano sopra il piano campagna come alberi ed edifici). Questi dati, inoltre, hanno un prezzo nettamente più elevato rispetto ai dati Planet; i dati WorldView2 e Pleiades hanno un costo unitario (\$/km²) di (LAND info, Imagery Pricing, \$ USD per km², luglio 2023):

- WorldView2, 50 cm, 4 bande: \$17.50 (da archivio), \$27.50 (nuovo);
- Pleiades 1A/1B 50 cm, 4 bande: \$12.50 (da archivio), \$21.25 (nuovo).

Il punto di forza di questi dati usati come strumento di monitoraggio dello stato di salute della vegetazione è la loro risoluzione geometrica, la quale permette una visualizzazione molto dettagliata dell'area di studio, e che rende tali dati la soluzione migliore nel caso di analisi su aree non molto estese (es. a scala di olivo).

Riguardo i dati Planet invece, la risoluzione geometrica di 3 m risulta essere il principale fattore limitante; l'individuazione dei singoli olivi tramite un pixel evidenzia che questa risoluzione è la minima richiesta per svolgere questo tipo di analisi. L'analisi di change detection effettuata tramite questi dati ha tuttavia restituito risultati migliori per certi versi, data la maggiore consistenza di dati a disposizione. Questi dati infatti sono nettamente più economici (\$ USD/km²) e ciò consente di ottenere, a parità di prezzo rispetto alla precedente soluzione, un

numero molto più elevato di acquisizioni sull'area monitorata per osservare in maniera più approfondita il fenomeno ed adottare misure preventive più efficaci. Inoltre la serie a disposizione consisterebbe in dati aventi la stessa natura, e ciò risolverebbe le due principali criticità riscontrate nelle precedenti AOIs (sovrapposibilità non perfetta tra i dati e instabilità di alcuni indici). Pertanto tali dati risultano essere i più idonei al monitoraggio a scale più grandi (es. Comunali).

In aggiunta a ciò, per arricchire, integrare e potenziare quanto realizzato, considerando lo stato dell'arte e i progetti attuali (conclusi, in corso e in fase di definizione) nei quali questo lavoro si colloca, tenendo conto dei costi in funzione dei benefici, una soluzione ottimale al monitoraggio del territorio per ottimizzare le misure del contenimento del batterio *Xylella* consiste nell'utilizzo di dati Planet, incrementando il raggio di azione delle analisi e associandole a rilievi sul campo (ispezioni visive o tramite UAV/APR) per constatare che un eventuale gradiente degli Indici di Vegetazione corrisponda ad un contagio degli olivi e programmare strategie di contenimento in tempo utile.

9. Bibliografia

- SAPONARI, M., et al. Isolation and pathogenicity of *Xylella fastidiosa* associated to the olive quick decline syndrome in southern Italy. *Scientific reports*, 2017, 7.1: 17723.
- DE FILIPPIS, Riccardo. La vicenda annosa di *Xylella fastidiosa*: analisi del caso *Xylella* sui quotidiani. 2019.
- SAPONARI, Maria, et al. Identification of DNA sequences related to *Xylella fastidiosa* in oleander, almond and olive trees exhibiting leaf scorch symptoms in Apulia (Southern Italy). *Journal of Plant Pathology*, 2013, 95.3.
- Redazione, “*Xylella* va fermata, già 1,2 mld di danni”, Coldiretti.it, 19 gennaio 2019 <https://www.coldiretti.it/economia/xylella-va-fermata-gia-12-mld-danni>
- R. ALMEIDA, “Can Apulia’s olive trees be saved?”, *Science*, 2016
- BASSI, Roberto; MORELLI, Giorgio; SALAMINI, Francesco. Rapporto *Xylella*. *Accademia dei Lincei*, 2016, 1.
- EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY. Statement of EFSA on host plants, entry and spread pathways and risk reduction options for *Xylella fastidiosa* Wells et al. *EFSA Journal*, 2013, 11.11: 3468.
- CIERVO, Margherita. Le comunità locali e il processo di salvaguardia del territorio. Il caso del Salento durante e dopo la cosiddetta “emergenza *Xylella*”. *Placetelling. Collana di Studi Geografici sui luoghi e sulle loro rappresentazioni*, 2019, 2019.2: 139-154.
- CIERVO, Margherita, et al. Il disseccamento degli ulivi in Puglia. Evidenze, contraddizioni, anomalie, scenari. 2020.
- PUGLIA, Regione. Linee guida per il contenimento della diffusione di “*Xylella Fastidiosa* subspecie pauca ceppo CODIRO e la prevenzione e il contenimento del “complesso del disseccamento rapido dell’olivo” (CoDiRO). 2014.
- EFSA Panel on Plant Health (PLH), “Scientific Opinion on the risk to plant health posed by *Xylella fastidiosa* in the EU territory, with the identification and evaluation of risk reduction options”, *EFSA Journal*, 6 gennaio 2015
- EFSA, “Update of the Scientific Opinion on the risks to plant health posed by *Xylella fastidiosa* in the EU territory”, *EFSA Journal*, 15 maggio 2019

DELL'ANNA, Sara. *MONITORAGGIO SPAZIO-TEMPORALE MEDIANTE SENSORI MULTISPETTRALI DELL'EPIDEMIA DI XYLELLA FASTIDIOSA NELLA REGIONE PUGLIA= SPACE-TIME MONITORING BY USING MULTISPECTRAL SENSORS OF THE XYLELLA FASTIDIOSA EPIDEMIC IN THE PUGLIA REGION*. 2021. PhD Thesis. Politecnico di Torino.

STRONA, Giovanni; CARSTENS, Corrie Jacobien; BECK, Pieter SA. Network analysis reveals why *Xylella fastidiosa* will persist in Europe. *Scientific Reports*, 2017, 7.1: 71.

GIAMPETRUZZI, Annalisa, et al. Transcriptome profiling of two olive cultivars in response to infection by the CoDiRO strain of *Xylella fastidiosa* subsp. pauca. *BMC genomics*, 2016, 17.1: 1-18.

BOSCIA, D., et al. Incidenza di *Xylella* in oliveti con disseccamento rapido. *Informatore Agrario*, 2017, 27.59-64: 47-50.

SRIPADA, Ravi P., et al. Aerial color infrared photography for determining early in-season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, 2006, 98.4: 968-977.

ROUSE JR, John W., et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. 1974.

BANNARI, Abdou, et al. A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews*, 1995, 13.1-2: 95-120.

LOUHAICHI, Mounir; BORMAN, Michael M.; JOHNSON, Douglas E. Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International*, 2001, 16.1: 65-70.

GITELSON, Anatoly A.; KAUFMAN, Yoram J.; MERZLYAK, Mark N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote sensing of Environment*, 1996, 58.3: 289-298.

RAY, Terrill W., et al. Monitoring land use and degradation using satellite and airborne data. In: *Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop*. 1993.

HUETE, Alfredo R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 1988, 25.3: 295-309.

QI, Jianguo, et al. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of environment*, 1994, 48.2: 119-126.

RONDEAUX, Geneviève; STEVEN, Michael; BARET, Frédéric. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote sensing of environment*, 1996, 55.2: 95-107.

HABOUDANE, Driss, et al. Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote sensing of environment*, 2004, 90.3: 337-352.

BANNARI, Abderrazak; ASALHI, H.; TEILLET, Philippe M. Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. In: *IEEE International geoscience and remote sensing symposium*. IEEE, 2002. p. 3053-3055.

GUALANO, Stefania, et al. Analisi Assistita da Immagini Aeree ad Elevata Risoluzione Geometrica per il Riconoscimento del Complesso del Disseccamento Rapido dell'Olivio Associato al Batterio Xylella fastidiosa in Puglia.

CASTRIGNANÒ, Annamaria, et al. Semi-automatic method for early detection of Xylella fastidiosa in olive trees using UAV multispectral imagery and geostatistical-discriminant analysis. *Remote Sensing*, 2020, 13.1: 14.

MAGGIORE, Giuseppe, et al. GIS analysis of land-use change in threatened landscapes by Xylella fastidiosa. *Sustainability*, 2019, 11.1: 253.

ZARCO-TEJADA, P. J., et al. Previsual symptoms of Xylella fastidiosa infection revealed in spectral plant-trait alterations. *Nature Plants*, 2018, 4.7: 432-439.