



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

CORSO DI LUREA MAGISTRALE IN

SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI

***MONITORAGGIO TRAMITE TELERILEVAMENTO DEI
PROCESSI DINAMICI DELLA VEGETAZIONE POST
INCENDIO NELLE PINETE DI PINO D'ALEPPO DEL
GARGANO***

Relatore

Dott. **Pirotti Francesco**

Laureanda

Semeraro Marcella

Matricola n. **1240693**

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

*A Michele,
collega e amico.
Per sempre nel mio cuore.*

Indice

ABSTRACT	1
RIASSUNTO	2
INTRODUZIONE	3
1. INCENDI BOSCHIVI IN AMBIENTE MEDITERRANEO	5
1.1 IL CONCETTO DI DISTURBO E GLI EFFETTI SUGLI ECOSISTEMI NATURALI.....	5
1.2 GLI INCEDNI BOSCHIVI E LA VEGETAZIONE MEDITERRANEA	15
1.3 GLI ASPETTI LEGISLATIVI E GLI STRUMENTI DI PREVENZIONE E PIANIFICAZIONE.	22
1.4 I PROCESSI DINAMICI DELLA VEGETAZIONE FORESTALE PERCORSO DAL FUOCO..	24
2. MATERIALI E METODI	26
2.1 L'AREA DI STUDIO	26
2.2 IL TELERILEVAMENTO E LE IMMAGINI SATELLITARI UTILIZZATE PER LO STUDIO DEGLI INCENDI.....	28
2.3 GLI INDICI NORMALIZZATI DI VEGETAZIONE UTILIZZATI PER LO STUDIO DELLE AREE PERCORSE DAL FUOCO	40
2.4 COSTITUZIONE DEL DATASET E PROCEDURE DI ELABORAZIONE DEGLI INDICI IN AMBIENTE GIS	44
3. RISULTATI E DISCUSSIONE	53
3.1 L'INDICE NDVI PER IL PERIODO COMPRESO TRA IL 2007 E IL 2022	53
3.2 L'INDICE NBR PER IL PERIODO COMPRESO TRA IL 2007 E IL 2022	64
3.3 DISCUSSIONE	66
CONCLUSIONI	67
<i>Bibliografia</i>	<i>69</i>
<i>Sitografia</i>	<i>71</i>

ABSTRACT

Forest fires occurring in mainland Italy belong to the class of those natural disturbances that periodically affect forest ecosystems especially in the Mediterranean areas.

To analyse the impact on forest ecosystems we generally use the data gathered through remote sensing, in particular multispectral images, for the calculation of indexes support the impact analysis phase such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Burn Ratio (NBR).

This approach is particularly useful during the assessment phase of the severity of the forest fires as well as within monitoring activities of the spontaneous dynamic processes after the passing of the fire.

The results of these methods of analysis enable to acquire useful information for the planning of vegetation restoration programs and to better understand the ability to respond of the Mediterranean forest ecosystems to these disturbance factors.

This paper concerned an area affected by fire in the Summer 2007, located in the north of Apulia (Gargano Promontory), marked by the widespread presence of wild forests of Aleppo pine. The images gathered through remote sensing used in this study and taken by satellites Landsat5 and Landsat8 refer to the year when the fire occurred and to the years after until 2022.

Their processing has enabled to highlight through the use of NDVI and NBR indexes, a gradual recovery of the area affected by the fire thus proving the ability to respond to natural or anthropic disturbance factors of Mediterranean forest ecosystems.

RIASSUNTO

Gli incendi boschivi che si verificano nella penisola italiana appartengono alla categoria di quei disturbi naturali che interessano periodicamente gli ecosistemi forestali soprattutto delle regioni mediterranee.

Per analizzare gli impatti sugli ecosistemi forestali, vengono generalmente utilizzati i dati telerilevati rappresentati soprattutto da immagini multispettrali per il calcolo di indici come il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e il Normalized Burn Ratio (NBR) di supporto nella fase di analisi degli impatti.

Tale approccio è particolarmente utile sia in fase di valutazione della severità degli incendi boschivi sia nell'ambito delle attività di monitoraggio dei processi dinamici spontanei successivi al passaggio del fuoco. I risultati di queste metodologie di analisi consentono di acquisire informazioni utili per la pianificazione di interventi di restauro vegetazionale e per comprendere la capacità di risposta degli ecosistemi forestali mediterranei a questi fattori di disturbo.

Lo studio ha riguardato un'area percorsa dal fuoco nell'estate del 2007, localizzata nella parte settentrionale della regione Puglia (promontorio del Gargano), caratterizzata dalla diffusa presenza di boschi spontanei di Pino d'Aleppo. Le immagini telerilevate utilizzate per lo studio, provenienti dai satelliti Landsat 5 e Landsat 8, si riferiscono all'anno in cui si è verificato l'incendio boschivo e ai successivi anni fino al 2022.

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di evidenziare, attraverso l'utilizzo degli indici NDVI e NBR, una graduale rinaturalizzazione delle aree percorse dal fuoco a dimostrazione della capacità di risposta ai fattori di disturbo naturali o di origine antropica degli ecosistemi forestali mediterranei.

INTRODUZIONE

Nel contesto mediterraneo il fuoco ha sempre avuto un ruolo fondamentale nel plasmare gli ambienti terrestri e la vegetazione (Blasi et al., 2004), andando a modificare lo sviluppo e la distribuzione sul territorio dei diversi tipi di copertura del suolo, nonché l'interazione fra le comunità vegetali e animali; per tale motivo l'uomo, in passato, ha utilizzato il fuoco come mezzo per modificare l'ambiente naturale in modo da soddisfare le proprie esigenze.

Attualmente, più che in passato, il fenomeno degli incendi boschivi risulta essere una delle principali cause che porta alla perdita di buone porzioni del patrimonio forestale nazionale, con conseguente perdita di biodiversità e innesco di fenomeni erosivi. Sempre più spesso questi eventi tendono ad interessare porzioni di aree protette e contesti di interfaccia urbano-foresta, determinando notevoli danni, non solo al patrimonio naturale, ma anche alle infrastrutture e alle strutture antropiche, con conseguente aumento dei rischi per le popolazioni locali.

Gli incendi boschivi, in particolare, quando caratterizzati da un elevato grado di severità determinano importanti alterazioni della composizione specifica e della struttura dei popolamenti forestali interessati che, dopo il passaggio del fuoco, necessitano di tempi più o meno lunghi per il ripristino degli equilibri naturali.

La vegetazione forestale è in grado spontaneamente di reagire ai fenomeni di disturbo con processi dinamici di rinnovazione e di rigenerazione che determinano, dove possibile, il parziale o totale ripristino della copertura vegetale. Risulta quindi fondamentale sviluppare procedure e metodologie che consentano di studiare e interpretare al meglio tali processi dinamici, sfruttando le numerose potenzialità dei dati telerilevati e dei sistemi di elaborazione attualmente disponibili. Le immagini telerilevate multispettrali, in particolare, sono adatte per individuare e monitorare le aree percorse dal fuoco, nonché i processi dinamici post incendio. La presenza di più sensori, su uno stesso satellite, permette infatti di acquisire molteplici intervalli spettrali tali da consentire una ripresa della stessa scena su lunghezze d'onda differenti, con risoluzioni temporali sempre più contenute. Tali sistemi di osservazione terrestre, permettono di disporre di informazioni di elevata qualità anche a media e grande scala.

Nella fase preliminare all'uso di immagini telerilevate è importante individuare quali proprietà spettrali caratterizzano i territori percorsi dal fuoco. Gli incendi boschivi, infatti, producono due effetti principali sulla vegetazione, ovvero: la produzione e l'accumulo di materiale combusto e l'alterazione della struttura e della tessitura della vegetazione, che lascerà sul territorio un segno incisivo definito *fire scar*. Solitamente la presenza di materiale combusto sul territorio segnala in maniera inconfondibile il passaggio del fuoco con una permanenza dello stesso sul terreno

variabile a seconda della tipologia di foreste interessate e delle caratteristiche morfologiche delle aree. Un ulteriore elemento fortemente condizionato dal passaggio del fuoco è la struttura dei popolamenti interessati che, a seconda dei gradi di severità degli incendi, può rimanere fortemente alterata anche per lunghi periodi. Gli elementi evidenziati possono essere identificati tramite l'analisi di immagini telerilevate che contribuiscono a comprendere non solo l'estensione degli incendi ma anche la loro gravità. I dati telerilevati sono inoltre indispensabili per interpretare i successivi fenomeni di ripresa vegetativa post incendio.

Le aree percorse dal fuoco sono solitamente sensibili alla regione dell'infrarosso vicino (NIR) dello spettro elettromagnetico; infatti, la vegetazione non percorsa dal fuoco mostra solitamente una forte riflettività nella zona del NIR, a differenza delle aree incendiate che invece assorbono fortemente in questa porzione dello spettro. Inoltre, i risultati degli studi e delle applicazioni effettuate (Blasi, l.c.) evidenziano che la riduzione della riflettività nel NIR sia direttamente proporzionale all'intensità dell'incendio.

Nella presente tesi viene esposta la tematica del telerilevamento e della rinnovazione post incendio in un'area localizzata nel settore settentrionale della Regione Puglia, in particolare nella zona nel promontorio del Gargano, caratterizzata dalla diffusa presenza di comunità forestali dominate da conifere mediterranee (Pino d'Aleppo), frequentemente interessate nel passato dal passaggio del fuoco e attualmente da fenomeni di rinnovazione e rigenerazione.

Grazie all'utilizzo delle immagini telerilevate multispettrali e a specifici indici di vegetazione (NBA, NDVI), è stato possibile interpretare i processi dinamici di rigenerazione in atto, sia in termini di superfici interessate che in termini di tempo necessario per la ricolonizzazione delle aree percorse dal fuoco. L'analisi dei dati telerilevati ha riguardato un arco temporale di circa 15 anni, compreso tra il 2007 e il 2022.

1 INCENDI BOSCHIVI IN AMBIENTE MEDITERRANEO

1.1 CONCETTO DI DISTURBO E EFFETTI SUGLI ECOSISTEMI

Gli incendi boschivi rientrano nella macrocategoria dei disturbi naturali. Il concetto di disturbo naturale viene definito da *White e Pickett* nel 1985 (White e Pickett, 1985):

“A disturbance is any relatively discrete event in time that disrupts ecosystem, community, or population structure and changes resources, substrate availability, or the physical environment”.

Traduzione: “Un disturbo naturale è un qualunque evento discreto nel tempo che altera la struttura di un ecosistema, comunità o popolazione e modifica la disponibilità delle risorse e l’ambiente fisico”.

Il disturbo naturale, quindi, è un evento discreto, che può essere ben identificato sia nel tempo che nello spazio, che determina l’alterazione della struttura degli ecosistemi attraverso la morte parziale o totale degli individui di una popolazione o di una comunità. Queste alterazioni possono essere classificate in due tipologie: quelle reversibili e quelle irreversibili. È importante ricordare però che i disturbi sono parte integrante degli ecosistemi forestali grazie ai quali, al loro interno, si mantiene un alto grado di biodiversità.

Il concetto di disturbo può essere distinto in base al tipo di agente o fattore che lo determina, in particolare è possibile distinguere due categorie, che vanno a raggruppare da un lato i disturbi determinati da agenti biotici e dall’altro quelli determinati da agenti abiotici.

Tra gli agenti biotici rientrano ad esempio la pullulazione di insetti, l’attacco di patogeni o la presenza massiccia di erbivori; invece, tra gli agenti abiotici rientrano eventi come la siccità, gli schianti da vento, le valanghe, le alluvioni, le frane, le eruzioni vulcaniche e gli incendi.

Le cause dei disturbi all’interno di un ecosistema vengono influenzate da diversi fattori tra loro correlati:

-fattori predisponenti: fattori legati alla posizione del sito e alle sue condizioni ambientali, con particolare riferimento a quelle climatiche;

-*fattori scatenanti*: fattori che aumentano notevolmente la quantità di stress;

-*fattori di contributo*: fattori che solitamente da soli non comportano la morte degli individui, ma che in presenza di un sito già stressato, ne aumenta lo stress portandolo alla morte; solitamente fanno parte di questa categoria i patogeni.

Il concetto di disturbo è spesso correlato al concetto di stress.

Lo stress, a differenza del disturbo è un evento di intensità minore di tipo continuo che, tramite condizioni chimiche o fisiche, determina l'alterazione dell'ecosistema allontanandolo da una situazione ottimale o di equilibrio. Spesso però lo stress si presenta con effetti cumulativi che possono portare ad un massiccio deperimento degli ecosistemi fino a provocare, se il fenomeno persiste nel tempo, la morte delle piante.

Parlando di disturbi naturali è necessario far riferimento anche al concetto di *growing space* o *spazio di crescita*: ogni albero, all'interno di una foresta, utilizza vari fattori di crescita come luce, acqua, nutrienti, ossigeno, etc., finché il loro accrescimento non viene limitato dall'indisponibilità di uno o più fattori. Questo fenomeno prende il nome di *indisponibilità del fattore limitante*, che causa il mancato accrescimento della pianta finché il fattore non torna nuovamente disponibile. Successivamente l'accrescimento continuerà fino a quando un altro fattore non diventerà limitante.

Per lo studio delle dinamiche forestali è possibile ricorrere a una generalizzazione del concetto di *growing space*, nella quale si considera che l'intero sito ne contenga una certa quantità e che esso può variare nel tempo e nello spazio.

Il *growing space* può essere suddiviso in:

- *growing space totale*: spazio di crescita fornito da quel determinato sito in quelle determinate condizioni;

- *growing space occupato*: spazio di crescita occupato dalle piante;

- *growing space disponibile*: spazio di crescita non utilizzato.

Il verificarsi del disturbo in un sito può variare il *growing space* in due modi:

- eliminando le piante esistenti in un'area, rendendo disponibile lo spazio di crescita per altre piante già presenti o che si insedieranno dopo il disturbo;

-modificando la quantità totale di *growing space* disponibile, ovvero andando a modificare la disponibilità delle risorse presenti nel sito per le piante, andando ad alterare la disponibilità di acqua, nutrienti, ossigeno, etc.

Tra i disturbi che creano un notevole impatto in ambiente mediterraneo, gli incendi boschivi sono particolarmente influenti. Essi determinano fenomeni di erosione o compattazione del suolo, diminuendo il *growing space totale*, che comporta l'incapacità di trattenere l'umidità,

riduce il volume disponibile per la penetrazione delle radici e la disponibilità di ossigeno e dei nutrienti. Al contrario disturbi come schianti da vento possono incorporare sostanza organica nel suolo aumentando la disponibilità di nutrienti, umidità e ossigeno per le radici.

Pertanto, i disturbi naturali esercitano un impatto profondo sugli ecosistemi forestali perché eliminano parte della vegetazione e tendono a ‘liberare’ *growing space*, rendendolo disponibile per le piante che si insedieranno successivamente, chiamate colonizzatrici.

In passato i disturbi sono stati spesso considerati come fenomeni quasi innaturali, poiché interrompevano il “normale” ciclo vitale ed evolutivo del sistema naturale, venivano visti come eventi presenti al di fuori del sistema. Questo evidenzia come vi sia una visione antropocentrica, nel dare un’accezione negativa all’avvento del disturbo naturale, in quanto questo può risultare una minaccia per i beni e per la vita dell’uomo. In realtà dal punto di vista naturale non è così; il disturbo può essere interpretato come un trasferimento di risorse, inteso come scambio di materia ed energia da una componente dell'ecosistema, come ad esempio gli alberi, ad un'altra, come i bioriduttori.

Tale ruolo rilevante, all’interno delle dinamiche evolutive degli ecosistemi forestali, è stato riconosciuto solo negli ultimi 20 - 30 anni, grazie a tecnologie e a mezzi che hanno permesso di conoscere la magnitudo, la frequenza e l'universalità di questi fenomeni. Per tale motivo oggi i disturbi naturali sono ormai considerati come processi ecosistemici fondamentali che contribuiscono a creare habitat e risorse a sostegno della diversità biologica.

È importante ricordare che l’origine dei disturbi può essere:

- Esogena, quando è esterna al sistema, ma è sensibile alle condizioni interne dello stesso, come ad esempio accade per gli schianti da vento;
- Endogena, quando l’origine è interna al sistema, ma spesso richiede un innesco esterno; ciò che determina, ad esempio, la pullulazione dell’ *Ips typographus* (bostrico dell’abete rosso).

Acquisiscono un peso rilevante nelle dinamiche dei disturbi, le caratteristiche strutturali di un popolamento che possono aumentare o diminuire la predisposizione dello stesso ad essere soggetto o meno a un determinato disturbo, andando ad influire sulla severità dell’evento; l’impatto di un disturbo è la risultante ottenuta dalla magnitudo del disturbo stesso e dalla predisposizione del popolamento a quel particolare tipo di evento.

Esiste una relazione tra la magnitudo e la frequenza. Essa, infatti, come si evince dal grafico sottostante, è inversamente proporzionale alla frequenza del disturbo; l’aumento di uno comporta la diminuzione dell’altro fattore (fig.1).

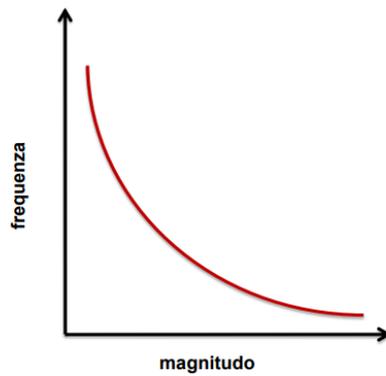


Figura 1: Grafico Frequenza/Magnitudo

Nel grafico successivo si può vedere la risposta di un popolamento forestale interessato da una serie di disturbi (fig.2).

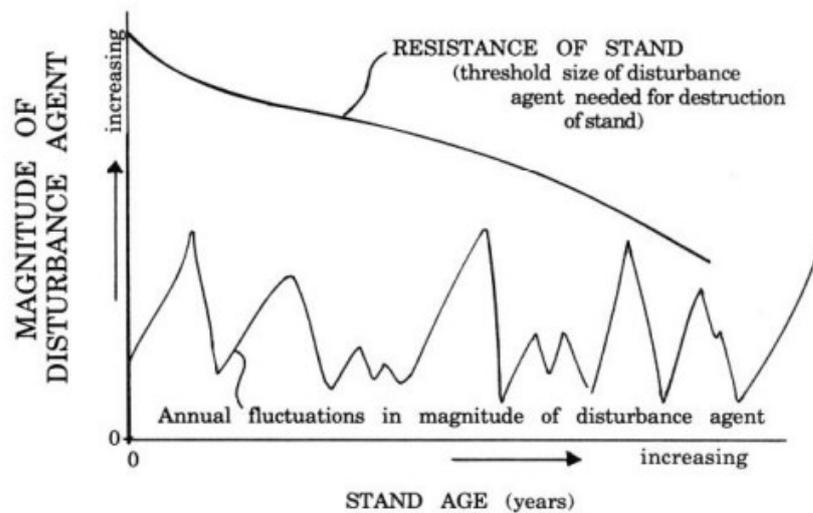


Figura 2: Grafico Magnitudo disturbo/ Età popolamento (Oliver C. D. et al., 1996)

Osservando il grafico vi è una fluttuazione dell'intensità del disturbo nel popolamento, che determina la presenza di diversi picchi. Se si fa riferimento alla resistenza del popolamento al disturbo, si nota come all'inizialmente il popolamento ha una forte resistenza nei confronti del disturbo stesso, grazie al quale, pur presenti alte intensità degli eventi, non si verificano grossi danni.

Ma se negli anni il disturbo tende a ripresentarsi periodicamente, con intervalli che possono essere regolari o irregolari e con intensità differenti, all'aumentare dell'età del popolamento si avrà una diminuzione della sua resistenza e conseguente elevata severità del disturbo su di esso.

Quindi a pari intensità, gli effetti del nostro disturbo sull'ecosistema sono diversi all'aumentare dell'età; più aumenta l'età del popolamento, più diminuisce la resistenza ai disturbi; per tale motivo bisogna mantenere i popolamenti il più possibile eterogenei, dal punto di vista strutturale e compositivo.

La *stabilità* di un ecosistema o popolamento forestale è data dalla sua capacità di rimanere nelle condizioni esistenti o di ritornare a queste dopo un disturbo. Questa può essere determinata o attraverso la *resistenza* di un popolamento che permette all'ecosistema di contrastare un disturbo, oppure attraverso la *resilienza*, che è la capacità di un ecosistema di poter riacquistare le sue caratteristiche originarie dopo un disturbo, in tempi più o meno brevi.

C'è da tener conto che la resistenza è una sorta di *strategia passiva* all'impatto di un disturbo o di uno stress; mentre la resilienza non prevede che il popolamento resista all'evento, quindi possiamo identificarla come *strategia attiva*.

Solitamente per elevate intensità dei disturbi, le piante adottano comportamenti resilienti perché non sono in grado di resistere a tali intensità. Se, invece, più di frequente avvengono disturbi che presentano magnitudo sotto una certa soglia di energia, i popolamenti mantengono un comportamento di resistenza all'evento.

Solitamente i disturbi naturali, che avvengono su vasta scala e/o di elevata intensità, producono tipicamente un rapido rilascio o una distribuzione delle risorse presenti in una comunità sul territorio, rilasciando una grande quantità di energia.

È importante sapere come l'eterogeneità del disturbo, sia determinata oltre che dall'intensità e dalla severità del disturbo, anche dall'eterogeneità del paesaggio, che comporta la creazione di diverse nicchie ecologiche.

A causa dell'eterogeneità dell'intensità dei disturbi, variabile sia localmente che sulle diverse scale temporali e spaziali, nonché dell'elevata eterogeneità degli ecosistemi forestali e della presenza della componente stocastica degli eventi non ci saranno mai due disturbi identici.

Questa variabilità produce di conseguenza molteplici dinamiche post-disturbo che spesso tendono ad agire simultaneamente; per cui vengono a crearsi le giuste condizioni per cui dopo un evento si creano le condizioni per un nuovo disturbo.

Ogni disturbo, dipendente dal suo specifico agente, segna il territorio durante il suo passaggio, attraverso una 'firma' identificativa chiamata *landscape scar*; questa cicatrice è determinata dalle dimensioni, dalla forma e dal perimetro che il disturbo lascia sul paesaggio o sull'ecosistema interessato (fig.3).

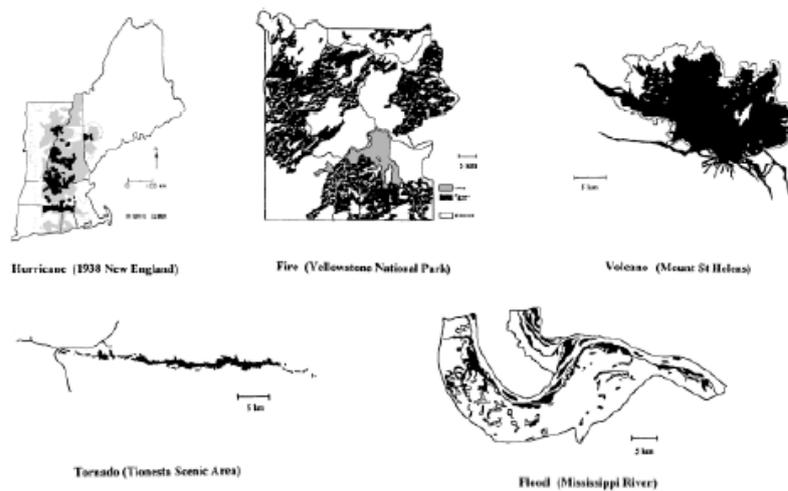


Figura 3: diverse tipologie di Landscape scar determinate dai vari disturbi naturali (Foster D. et al. 1998)

È importante evidenziare quanto l'eterogeneità del paesaggio, determinata dalla sua composizione specifica e dalla presenza di soluzioni di continuità, sia fondamentale solitamente nel rallentare la distribuzione dei disturbi, non permettendo, ad esempio, la propagazione verso popolamenti vicini. Spesso le zone che presentano condizioni idonee all'insorgere di alcuni disturbi sono proprio le zone di confine o i bordi in cui sono presenti più piante stressate e quindi più soggette a fenomeni di instabilità. Per questo sarebbe meglio avere un popolamento diversificato, che fornisce soluzioni di continuità tra i diversi tipi di struttura e le diverse formazioni forestali, in grado di garantire diverse tipologie di resistenza e di resilienza all'interno dello stesso popolamento.

C'è una distinzione tra disturbi *localizzati* e disturbi *diffusi*.

I disturbi *localizzati* sono quei disturbi più facili da prevedere, in quanto è possibile calcolarne la frequenza; essi interessano generalmente pochi tipi forestali; tra questi tipi di disturbo rientrano le valanghe e le piene.

I disturbi *diffusi*, invece, sono quei disturbi difficili da poter prevedere in quanto non sono legati a nessuna entità spaziale ben definita. In questo caso la frequenza può essere calcolata solo per comprensori, interessando diverse tipologie forestali.

Uno tra i più grandi problemi riguardanti i disturbi è la variabilità, esistono svariati elementi che possono influenzare un disturbo, motivo per il quale viene effettuata una classificazione dell'evento su due diverse scale, quella temporale e quella spaziale. Nella scala temporale troviamo diversi elementi influenzati dalla stagionalità e quindi avremo il periodo di manifestazione, la frequenza, il tempo di ritorno e la durata del disturbo. Mentre nella scala spaziale rientrano elementi come la dimensione, l'intensità, l'eterogeneità determinata dalla

variazione di intensità e severità del disturbo all'interno dell'area interessata e le *Biological legacies*, componenti organiche ancora presenti dopo il disturbo.

Tali elementi sono legati tra di loro, agendo tendenzialmente in maniera sinergica. Le condizioni climatiche e topografiche tendono ad influenzare ulteriormente il modo in cui le variabili interagiscono, sia a scala locale che diffusa.

Quindi è possibile affermare che i disturbi, il tipo di vegetazione, con relative caratteristiche compositive e strutturali, i fattori fisici, come la topografia, il tipo di suolo con annesse le sue caratteristiche edafiche, e le condizioni climatiche locali, sono tutti interconnessi tra di loro andando a creare un equilibrio che va a determinare quello che viene chiamato *regime del disturbo naturale*.

Il *regime del disturbo o disturbance regime* è determinato dalla combinazione delle cause, delle dimensioni, della frequenza e della severità dei disturbi che agiscono nell'ambito di un ecosistema o in una determinata area geografica. La presenza di variazioni nel regime di disturbo determinano delle marcate differenze sia nella composizione paesaggistica che all'interno dei popolamenti in termini di numero, tipo e distribuzione spaziale degli habitat. Quindi si può dire che il *regime di disturbo* è determinato dalla successione temporale dei disturbi, aventi specifiche caratteristiche, che portano alla formazione di uno specifico popolamento forestale con caratteristiche derivanti dall'azione del disturbo.

Per poter determinare un regime di disturbo nell'ambito di un ecosistema, è indispensabile avere una cospicua quantità di dati perché il regime è determinato dall'influenza nel lungo periodo di una serie di disturbi. Fattore rilevante nella definizione del regime diventa la presenza di specie che si sono evolute insieme a quel particolare regime di disturbo attraverso lo sviluppo di specifici adattamenti, determinandone la resilienza o la resistenza della specie al disturbo.

I regimi di disturbo possono essere classificati in:

- *Regime di disturbo storico*: è quel regime che ha determinato la formazione e il mantenimento di quel tipo di popolamento forestale e delle condizioni persistenti in quel sito.
- *Regime di disturbo appropriato*: è quel regime di disturbo idoneo a mantenere quel determinato popolamento forestale in quel determinato sito.
- *Regime di disturbo naturale*: è quel regime di disturbo presente in ambienti naturali influenzati minimamente o per nulla dall'azione antropica; ormai difficile da ottenere in quanto vi è una irrisoria quantità di boschi vergini o ambienti minimamente influenzati dall'uomo.

I regimi di disturbo non sono statici, ma variano nel tempo in risposta anche alle fluttuazioni climatiche e modifiche dettate dall'influenza antropica. Per tale motivo si prevede che gli attuali regimi, in particolare i *fire regimes* saranno soggetti a notevoli variazioni a causa del global change, fortemente accentuata dall'azione antropica.

Vi è un'importante teoria che definisce la presenza di una massima diversità di specie all'interno degli ecosistemi quando vi è un livello intermedio di frequenza e di intensità dei disturbi, questa prende il nome di *Intermediate Disturbance Hypothesis* (fig.4).

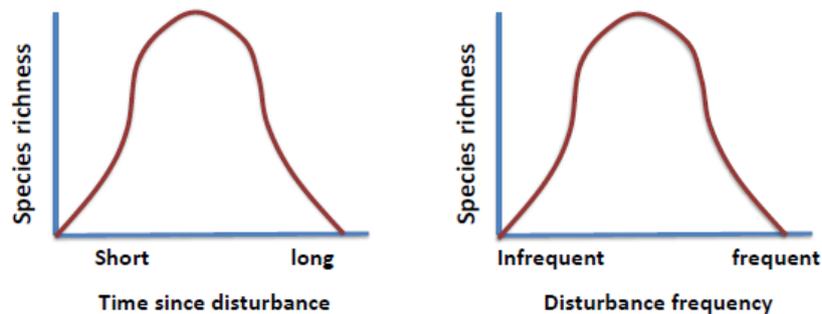


Figura 4 :Intermediate Disturbance Hypothesis (IDH)

Come è possibile notare dai due grafici la quantità di specie che è adatta a vivere in presenza di disturbi frequenti o di elevata intensità è molto ridotta; la stessa situazione si ritrova in ambienti in cui i disturbi sono poco frequenti o con bassa intensità. Nel caso di eventi con frequenze e tempi di ritorno intermedi si ha un'elevata ricchezza di specie.

Se si associa questo concetto ai processi dinamici che avvengono negli ecosistemi forestali, è possibile evidenziare che il verificarsi di un determinato disturbo può favorire o velocizzare gli stessi, condizionando positivamente o negativamente gli equilibri ecosistemici (fig.5).

Infatti, la mancanza di un determinato disturbo, all'interno dell'ecosistema, porta al proseguimento di questo lungo le varie sere, favorendo la colonizzazione da parte soprattutto delle specie definitive. Invece in ambienti soggetti a livelli intermedi di disturbo è possibile avere in contemporanea la coesistenza di specie pioniere, intermedie e definitive nello stesso sito.

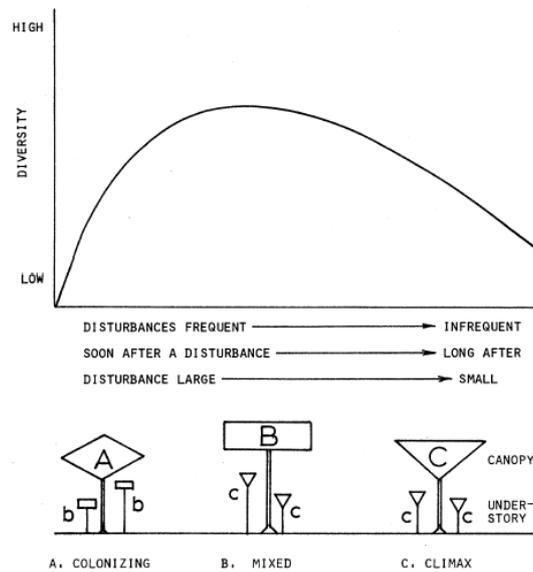


Figura 5: Andamento dell'IDH riferito al popolamento forestale (Connell J. H., 1978)

Questo determina la presenza di micrositi aventi condizioni microclimatiche differenti, portando alla determinazione di diverse forme biologiche e strutture, oltre che ad un'elevata disponibilità di risorse che forniscono habitat a molti organismi.

Per poter effettuare la classificazione di un disturbo, è necessario seguire i seguenti step:

- Identificare il tipo di disturbo in base all'agente;
- Definire l'intensità (magnitudo) e la severità, quindi il suo impatto;
- Definire la frequenza o il tempo di ritorno;
- Determinare l'estensione spaziale;
- Identificare le *biological legacies* (residui, quantità e qualità di organismi che sopravvivono al disturbo).

Le *biological legacies* sono organismi, strutture o modelli ereditati da un ecosistema precedente e spesso includono alberi maturi, snag e tronchi abbattuti che rimangono dopo il disturbo naturale o la raccolta (Society of American Foresters, 2008). Oltre a questi elementi sono da considerare anche la vegetazione del sottobosco e piante vascolari che sopravvivono sotto forma di semi, rizomi e tuberi, nonché popolazioni residue di animali. Questi risultano essere elementi fondamentali per le successioni, per la ricostruzione dei popolamenti e gli ecosistemi forestali in tutte le sue componenti. Potenzialmente le *biological legacies* possono creare delle strutture di protezione, facilitando la sopravvivenza e la rigenerazione post disturbo della rinnovazione, in

sostituzione al popolamento precedente, fornendo energia e nutrienti, modificando e stabilizzando le condizioni ambientali.

1.2 GLI INCENDI BOSCHIVI E LA VEGETAZIONE MEDITERRANEA

Gli incendi boschivi rientrano, come detto precedentemente, tra i disturbi che si verificano all'interno degli ecosistemi forestali. Come riportato nella legge quadro 353 del 2000 all'art.2, per incendio boschivo si intende:

“un fuoco con suscettività a espandersi su aree boscate, cespugliate o arborate, comprese eventuali strutture e infrastrutture antropizzate poste all'interno delle predette aree, oppure su terreni coltivati o incolti e pascoli limitrofi a dette aree.”

Il fuoco costituisce un elemento rilevante che condiziona gli equilibri e la stabilità degli ecosistemi forestali. Per cogliere la complessità del fenomeno è bene capire come questo si origina e cosa succede durante la sua azione.

Per capire come un incendio ha origine, bisogna partire dal concetto di *combustione*. La *combustione* è il processo chimico con il quale avviene l'ossidazione del combustibile, da parte del comburente, andando a rilasciare nell'ambiente una componente volatile, che permette l'innesco della fiamma, continuando a mantenere e a sostenere la combustione.

Il processo di combustione può essere riassunto attraverso il *triangolo del fuoco*. Esso illustra la relazione che intercorre tra i 3 elementi di base, *comburente*, *combustibile* e *fonte d'innesco*, necessari al sostentamento della combustione (fig.6).



Figura 6: Il triangolo del fuoco

È importante specificare che per innescarsi, un incendio, c'è bisogno di una proporzione adeguata tra ossigeno, calore e combustibile.

La combustione è un processo che avviene in diverse fasi, che sono:

- *Preignizione;*

- *Ignizione;*
- *Estinzione.*

È bene ricordare che tutte queste fasi avvengono contemporaneamente durante un incendio.

La *preignizione*, prima fase della combustione, si suddivide a sua volta nella fase di *preriscaldamento* e di *pirolisi*; queste due fasi sono importanti poiché determinano quanto combustibile è pronto a bruciare per poter sostenere la combustione.

Nella fase di *preriscaldamento*, il calore, proveniente da una fonte esterna, viene usato per rimuovere l'acqua presente all'interno del combustibile, finché c'è acqua all'interno, la temperatura non può salire, una volta che vi è l'evaporazione completa dell'acqua, la temperatura potrà innalzarsi oltre i 100 °C.

La fase di *pirolisi*, invece, presenta la degradazione termica del combustibile; il calore inizia a salire, comportando la rottura dei legami delle varie molecole di cellulosa, lignina etc. presenti nel legno, ottenendo catene più corte. Queste riusciranno a reagire con il comburente attuando la combustione.

I gas volatili, reagendo con il comburente, tendono ad infiammarsi dopo aver superato la temperatura di 300 °C, dando origine alla combustione con fiamma. A questo punto è la fiamma stessa a generare una notevole quantità di calore, che servirà a preriscaldare il combustibile adiacente, rimuovendo tutta l'acqua e far avvenire la pirolisi, creando nuovo combustibile gassoso, originando così una *catena di reazione*. A questo punto la catena diventa sostenibile e non c'è bisogno più di alcun innesco esterno in quanto è la fiamma stessa a produrre l'innesco e il calore necessario, trasformando la reazione da *endotermica* ad *esotermica*, in quanto vi è il rilascio di calore.

Con il superamento dei 300°C, abbiamo la fase di *iniezione* in cui il combustibile gassoso si infiamma e andrà incontro a combustione, legandosi all'ossigeno, entrando nella fase di combustione vera e propria.

Quando una delle componenti presenti ai lati del triangolo non apporterà più il suo contributo nella combustione avremo l'ultima fase detta *fase di estinzione*.

Gli incendi boschivi non sono tutti dello stesso tipo in tutto il territorio, a seconda delle caratteristiche ambientali, prevalgono determinate causali e determinati comportamenti. Nella Regione biogeografica mediterranea, ad esempio, gli incendi boschivi rappresentano (Bovio et al., 2014) un fattore determinante per le dinamiche vegetazionali. Attualmente gli incendi in ambiente mediterraneo costituiscono la causa principale del degrado o in casi estremi della scomparsa delle superfici forestali. Ciò è ulteriormente aggravato dai cambiamenti climatici che

favoriscono la diffusione degli incendi, sia in termini di frequenza che di superfici percorse. Dopo la fine della Seconda Guerra Mondiale c'è stato, da parte della popolazione, l'esodo verso le città con conseguente abbandono delle aree rurali, comportando una notevole espansione delle superfici boscate in aree dove prima erano presenti campi coltivati o utilizzati per il pascolo, oltre alla riduzione delle attività selvicolturali, favorendo l'accumulo di biomassa combustibile. Questo ha portato ad avere condizioni ecologiche, che associate ad una massiccia urbanizzazione del territorio, tramite la presenza di strade e residenze, hanno portato all'incremento esponenziale di incendi di tipo estesi e distruttivi.

In Europa vi è un'alta frequenza di incendi concentrata nei paesi mediterranei; di fatti la media della superficie annua percorsa dal fuoco in Europa è pari a 550.000 ha, di cui il 95% di essa si verifica nei Paesi mediterranei, con circa 35.000 eventi l'anno (Blasi et al., 2004).

Tra gli stati più colpiti dell'Unione Europea vi sono l'Italia, la Francia, la Grecia, il Portogallo e la Spagna.

In particolare, per quanto riguarda il territorio italiano, le indagini sugli incendi boschivi si basano sull'utilizzo di specifici parametri, tra cui i più indicativi sono il numero di incendi, la superficie percorsa dal fuoco e la superficie media per incendio. Tali variabili tendono però a cambiare anche al variare delle condizioni meteorologiche. In Italia il numero di incendi medi annuo si aggira intorno agli 8.310 eventi, come riportato dal Corpo Forestale dello Stato (CFS) per il periodo 1997-2003, oltre a presentare una superficie boscata percorsa media annua di 47.953 ha (CFS, 2004).

Attraverso il monitoraggio, il rilevamento e la registrazione degli eventi nel tempo, si è constatato che nelle regioni a nord dell'Italia, sia il numero degli incendi che la superficie percorsa dal fuoco risultano essere contenuti, rispetto alle regioni centrali e meridionali, oltre che l'insorgere degli incendi è limitato solo al periodo invernale, momento in cui le piante sono in stasi vegetativa. Unica regione del nord a fare eccezione risulta essere la Liguria, che è la regione italiana con maggior coefficiente di boscosità e con una distribuzione degli eventi durante tutto l'anno. Essa ha un valore di superficie media percorsa dal fuoco molto più elevata rispetto alle altre regioni settentrionali. Scendendo verso le regioni centrali vi è un incremento sia del numero degli eventi che della superficie media percorsa dal fuoco. Si riscontrano valori molto alti nel numero degli incendi in Sardegna, che supera di 10 volte il numero degli eventi accaduti in regioni come Piemonte o Lombardia pur presentando la stessa dimensione territoriale. Nella parte meridionale della penisola, le regioni più colpite sono Calabria, Campania e Sicilia. La Sicilia presenta valori molto alti di superficie boscata media annua percorsa dal fuoco pari a circa 7.336 ha.

Troviamo inoltre, la Puglia che pur avendo un'estensione limitata delle superfici boscate è caratterizzata (periodo di indagine 1997-2003) da un numero medio annuo di incendi pari a 367 e da una superficie media annua boscata percorsa dal fuoco di 2.517 ha (fig.7).



Figura 7: Mappa della infiammabilità dei boschi italiani (Bovio et al., 2014)

Gli incendi boschivi, in Italia, pur essendo un fenomeno che interessa in maniera diffusa tutto il territorio nazionale, presenta delle caratteristiche differenti in base alla zona a cui si fa riferimento e soprattutto in relazione ai tipi di vegetazione presenti.

Nelle regioni meridionali, in particolare, sono diffuse tipologie forestali, quali leccete, sugherete e pinete mediterranee, con i valori più alti del *Grado di infiammabilità* (tab. 1).

European Forest Type	Categoria Forestale	Superficie (ha)	Grado di Infiammabilità
3.1 Subalpine larch-arolla pine and dwarf forest	Larice e cembro	382.372	1,5
3.2 Subalpine and mountainous spruce and mountainous mixed spruce Silver fir Forest	Abete rosso	586.082	2,0
	Abete bianco	68.460	2,0
3.3 Alpine Scot pine and Black pine forest/10.5 Altimediterranean pine forest	Pino Silvestre e montano	15.161	3,0
	Pino nero, laricio e loricato	236.467	2,9
10.1 Mediterranean pine forest	Pinete di pini mediterranei	226.101	4,1
-	Altri boschi di fere, pure o miste	63.407	n.c.

7.3 Apennine Corsican mountainous beech forest	Faggete	1.035,103	2,0
5.1 Pedunculate oak-hornbeam forest	Rovere, roverella e farnia	1.084.247	1,8
5.2 Sessile oak hornbeam forest			
8.1 Downy oak forest			
8.2 Turkey oak, Hungarian oak and Sessile oak Forest	Cerrete, boschi di farnetto, fragno, vallonea	1.010.986	2,3
8.5 Macedonian oak forest	Castagneti	788.408	2,7
8.7 Chestnut forest			
8.8 Other thermophilous deciduous forest	Ostrieti, carpineti	852.202	2,5
-	Boschi igrofili	229.054	n.c.
-	Altri boschi caducifogli	994.777	n.c.
9.1 Mediterranean evergreen oak forest	Leccete	620.318	3,5
9.1 Mediterranean evergreen oak forest	Sugherete	168.602	3,3
-	Altri boschi di latifoglie sempreverdi	84.712	n.c.
Italia		8.582.968	2,4

Tabella 1: Grado di infiammabilità dei boschi italiani (Bovio et al., 2014)

Come si evince dalla tabella, le pinete di pini mediterranei hanno un Grado di infiammabilità pari a 4,1, mentre le leccete presentano un *Grado di infiammabilità* pari a 3.5. Questo induce a pensare che tutte le categorie forestali aventi un *Grado di infiammabilità* elevato sono più propense ad essere percorse dal fuoco.

La diffusione degli incendi boschivi oltre ad essere fortemente connessa al tipo di vegetazione è direttamente correlata agli aspetti gestionali. La mancata realizzazione degli interventi selvicolturali periodici favorisce infatti l'accumulo di materiale combustibile con l'aumento delle probabilità di innesco e di diffusione del fuoco, soprattutto nei contesti mediterranei.

Nonostante gli incendi boschivi costituiscano una criticità prioritaria per le foreste del mediterraneo, esse hanno sviluppato adattamenti e sistemi di risposta naturali prevalentemente rivolti all'innesco di processi dinamici di ricolonizzazione. Tali adattamenti sono possibili solo se non si hanno livelli alti di severità che portano alla distruzione completa degli ecosistemi forestali considerati.

Le varie strategie di tipo fisiologico e morfologico dei processi di adattamento, che le varie specie forestali hanno attuato per poter sopravvivere in condizioni ambientali estreme, rientrano in due tipi di dinamiche, che sono:

- Dinamiche di *resistenza*: rientrano tutti i processi adattativi dei popolamenti forestali grazie ai quali riescono a resistere e a contrastare stress o disturbi che si presentano sull'ecosistema;

- Dinamiche di *resilienza*: rappresentano la capacità di reazione dei popolamenti forestali nel rinnovarsi in tempi medio-brevi e ritornare allo stato pre-evento, dopo aver subito uno stress o un disturbo.

Per esempio il Pino d'Aleppo. presenta sia caratteri di resistenza che di resilienza al fuoco, poiché presenta una corteccia spessa (*pirofitismo passivo*) e la *serotinia* di coni (*pirofitismo attivo*) (Mercurio, 2016).

Per quanto riguarda la *serotinia* dei coni, la strategia di sopravvivenza è basata su un'abbondante disseminazione successiva all'evento (tab.2); il fuoco tende a stimolare l'apertura dei coni e a creare condizioni più favorevoli per la rinnovazione e lo sviluppo di piantine. La competizione con le altre specie vegetanti viene eliminata e si forma un substrato minerale più favorevole alla germinazione (Bovio l. c.). Tramite degli studi effettuati si è potuto constatare che in siti in cui c'è stato un maggior riscaldamento del terreno, si sia verificata una maggior produzione di seme. Ma se l'area è percorsa frequentemente dal fuoco, causa l'esaurimento della banca dei semi presente sul terreno, in quanto il tempo di ritorno tra i due eventi successivi non ha dato modo alle piante di raggiungere l'età produttiva e produrre nuovo seme.

Un altro adattamento che varie specie del genere *Pinus* adottano è quello di portare, in breve tempo, la chioma al di sopra della zona percorsa dagli incendi radenti, in modo tale da non farla interessare dal fuoco.

Mentre per specie pollonifere, come il Leccio (*Quercus ilex* L.), dopo il passaggio del fuoco, se questo non ha compromesso la parte ipogea delle piante, avremo la rigenerazione attraverso il ricaccio dei polloni.

Tra le dinamiche di resistenza, invece abbiamo, ad esempio, specie come Pino Domestico (*Pinus pinea* L.) e Sughera (*Quercus suber* L.) che presentano un ispessimento della corteccia, oltre che la chioma nella parte più alta della pianta.

Specie	Ricrescita vegetativa	Propagazione mediante semi
Alberi		
<i>Pinus halepensis</i>	+	-
<i>Quercus callipronos</i>	+	-
<i>Quercus ithaburensis</i>	+	-
<i>Quercus boissieri</i>	+	-
<i>Ceratonia siliqua</i>	+	-
<i>Styrax officinalis</i>	+	-
<i>Laurus nobilis</i>	+	-
<i>Arbutus andrachne</i>	+	-
<i>Rhamnus alaternus</i>	+	-

Pistacia palaestina	+	-
phillyrea media	+	-
Cercis siliquastrum	+	-

Tabella 2: Strategie rigenerative dopo il passaggio del fuoco (Blasi et al, 2004)

1.3 GLI ASPETTI LEGISLATIVI E GLI STRUMENTI DI PREVENZIONE E PIANIFICAZIONE

L'aumento del rischio di grossi incendi, causato dall'accumulo di necromassa all'interno dei boschi, dalla diminuzione di pratiche selvicolturali e dall'aumento del grado di urbanizzazione delle aree rurali, ha portato ad un maggiore rischio nelle aree di interfaccia urbano-foresta, rendendo più difficile il contrasto degli incendi boschivi (Bovio l. c.). Per tale motivo, dopo un primo aumento delle strutture per la lotta attiva, si è passati, tramite strategie europee, a dover incrementare quelle che sono le politiche di previsione e prevenzione a lungo termine. Questo ha permesso di spostarsi da una politica di controllo degli incendi a breve termine ad una politica di previsione e prevenzione a lungo termine, in cui si tende ad agire sulle cause strutturali che provocano gli eventi, attraverso una buona gestione forestale.

Dopo una lunga serie di lavori preparatori, la legislazione italiana ha portato alla regolamentazione delle attività selvicolturali e alla pianificazione e gestione degli interventi tramite la Legge Quadro 353/2000 "*in materia di incendi boschivi*". La legge ha lo scopo di regolamentare un settore operativo e complesso, individua specifiche responsabilità ai diversi livelli istituzionali e fornisce linee guida per i diversi apparati operativi coinvolti.

Tra gli strumenti che consentono di pianificare la prevenzione forestale degli incendi boschivi ci sono i piani AIB regionali e quelli relativi alle aree protette. Entrambi gli strumenti consentono di identificare le principali criticità e di definire gli strumenti di previsione, prevenzione e lotta attiva.

Per quanto riguarda i *piani regionali di previsione, prevenzione e lotta attiva agli incendi boschivi*, la Legge Quadro ha affidato la competenza alle regioni, le quali a loro volta provvedono ad elaborarli, adattandoli alle realtà territoriali e alle proprie organizzazioni operative. La validità degli stessi è triennale, anche se vengono sottoposti a revisioni annuali.

I Parchi Nazionali a loro volta vengono normati attraverso *piani delle attività di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi*. Gli obiettivi di questi strumenti di pianificazione sono quelli di migliorare la metodologia, attraverso una maggiore uniformità nella redazione della cartografia nazionale e quello di dare immediato supporto operativo, attraverso la cartografia AIB. Ogni ente gestore dei Parchi Nazionali è tenuto a redigere un proprio piano di previsione, prevenzione e lotta attiva contro gli incendi boschivi, tenendo presente delle specifiche emergenze naturalistiche dell'area protetta di appartenenza. Vista la delicatezza della problematica gestionale e dell'importanza che viene data alla prevenzione, si tende a coinvolgere i residenti informandoli sulle giuste pratiche da attuare per la prevenzione e previsione.

Il Ministero competente, il Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica, al fine di uniformare l'approccio metodologico per la redazione dei piani AIB relative alle aree protette ha redatto specifiche linee guida, oggetto di periodiche revisioni, per la redazione degli elaborati per la definizione dei principali obiettivi da perseguire.

1.4 I PROCESSI DINAMICI DELLA VEGETAZIONE FORESTALE PERCORSO DAL FUOCO

Il comportamento del fuoco viene influenzato e determinato da tre componenti che interagiscono tra loro:

- *Combustibili*: che costituiscono la fonte di energia necessaria per la combustione;
- *Topografia*: che può agire direttamente o indirettamente;
- *Condizione metereologiche*: dove rientrano parametri come temperatura, umidità relativa, velocità e direzione del vento.

Gli effetti del fuoco, interessando diversi tipi di ambienti ed ecosistemi, possono essere classificati in base al:

- *grado di intensità*;
- *tipo di incendio*.

Il fuoco in base al tipo di vegetazione interessata può sviluppare diversi tipi di incendio, che sono:

- *Incendi sotterranei*: sono incendi che avvengono negli strati superficiali del suolo, senza la presenza evidente di fiamma. Essendo limitata la presenza di ossigeno, avanza molto lentamente, ma avendo un *tempo di residenza* elevato, va a deteriorare completamente la sostanza organica presente, degradando notevolmente la stazione;
- *Incendi radenti*: sono caratterizzati da una fiamma bassa che brucia gli strati erbacei ed arbustivi; lo strato arboreo, invece, viene interessato solo dalla scottatura più o meno grave dei tronchi.
- *Incendi di chioma*: sono incendi che interessano lo strato arboreo, solitamente sono difficili da contrastare. Questi si suddividono a loro volta in *incendi di chioma passivi* e *incendi di chioma attivi*. I primi vengono generati dalla vicinanza del fronte di fiamma radente alla chioma che le riscalda e può determinare fenomeni di *torcing*, che rimangono isolati. Mentre gli *incendi di chioma attivi* tendono a propagarsi di chioma in chioma e si suddividono in:
 - *Incendi di chioma attivi dipendenti*: l'avanzamento del fronte aereo avviene parallelamente al fronte radente e prende il nome di *fuoco di barriera*;
 - *Incendi di chioma attivi indipendenti*: a causa del vento, il fronte di fiamma di chioma è molto più veloce del fuoco radente.

Uno dei processi dinamici più impattanti all'interno di un ecosistema (Pedrotti, 1995), che può crearsi dopo il passaggio del fuoco, è il processo di *regressione*. Questo determina una

significativa semplificazione delle associazioni vegetali, sia a livello strutturale che nella composizione vegetativa, che può comportare la completa sostituzione con altre associazioni oppure, in casi estremi, la scomparsa, comportando la degenerazione. In quest'ultimo caso, prende piede il processo di successione, ovvero la ricostruzione ex-novo delle associazioni vegetali attraverso cicli pluriennali, con l'insediamento iniziale delle specie pioniere, specie caratteristiche di stazioni poco favorevoli dal punto di vista trofico e prive di sostanza organica, creando le condizioni ottimali per l'arrivo di specie più esigenti, portando alla sua *rigenerazione*. Questo processo infatti determina la ricostruzione della copertura arborea, ricreando il quadro originario della stazione, con tempi e dinamiche variabili a seconda dell'area geografica considerata e della tipologia di vegetazione interessata.

L'insieme di piccoli e continui cambiamenti interni, lo scambio graduale di componenti, la sostituzione dei vecchi individui con i nuovi, che nascono grazie alla rinnovazione naturale, portano al graduale ripristino degli equilibri interni degli ecosistemi interessati.

In particolare, in ambiente mediterraneo gli adattamenti sviluppati nel tempo dalle diverse specie di interesse forestale presenti in questo contesto influenzano notevolmente i processi dinamici post incendio, determinando fenomeni di rigenerazione e rinnovazione anche a seguito di eventi con grado di intensità elevato.

2 MATERIALI E METODI

2.1 L'AREA DI STUDIO

L'area di studio oggetto della presente tesi è localizzata nel territorio pugliese, all'interno della subregione del Gargano. Il paesaggio garganico (Blasi, 2010) si differenzia dal resto del paesaggio pugliese, che risulta essere per lo più pianeggiante e collinare, per la presenza del promontorio montuoso omonimo, avente le sue massime quote nel monte Calvo (1.065 m) e nel monte Spigno (1009m). Si tratta di un territorio di origine carsica, su cui insiste una rete idrografica superficiale caratterizzata prevalentemente da corsi d'acqua con regime torrentizio, contraddistinto dalla maggiore presenza di aree boschive a livello regionale. Lungo tutto il litorale costiero esposto a sud-est predominano le pinete spontanee di Pino d'Aleppo (*Pinus halepensis* Mill.). Salendo di quota e spostandosi verso l'entroterra, i tipi di vegetazioni largamente presenti sono quelli prevalentemente costituite dal Leccio, per poi trovare le cerrete ed infine le faggete, che presentano il nucleo più ampio all'interno della Foresta Umbra. Sul versante meridionale, invece, risulta essere molto evidente il fenomeno del carsismo nell'area dei valloni, in cui sono presenti profonde incisioni della scarpata rocciosa, dove si è insediata una rara flora rupestre di tipo relittuale. Sono presenti, inoltre, sul tratto settentrionale della costa, due importanti ambienti lagunari, che sono il Lago di Lesina e il Lago di Varano.

Rientra a far parte della subregione del Gargano anche l'arcipelago delle Isole Tremiti, formato dalle isole di San Nicola, San Domenico, Pianosa e Capraia. Tra queste, l'Isola di San Domenico, la più grande, presenta vegetazione forestale, per lo più formata da Pino d'Aleppo e solo in limitati settori, dal Leccio.

Le pinete di Pino d'Aleppo, presenti sui versanti carbonatici del piano bioclimatico mesomediterraneo inferiore (Blasi, l.c.), occupano gran parte del settore costiero rupestre del Gargano, che va da San Menaio a Mattinata, e sulle Isole Tremiti, sempre a stretto contatto con la lecceta.

Queste pinete risultano essere generalmente monospecifiche nello strato arboreo, mentre nello strato arbustivo vi è l'abbondante presenza del Lentisco (*Pistacia lentiscus* L.) e di altre specie sempreverdi della macchia mediterranea, come il Mirto (*Myrtus communis* L.), l'Alaterno (*Rhamnus alaternus* L.), la Fillirea (*Phillyrea angustifolia* L.), il Tè siciliano (*Prasium majus* L.), l'Asparago (*Asparagus acutifolius* L.), la Robbia selvatica (*Rubia peregrina* L.) e la Salsapariglia nostrana (*Smilax aspera* L.). Il substrato erbaceo, di contro, tende ad essere abbastanza povero con la presenza di Paléo delle garighe (*Brachypodium ramosum* [L.] Roem. & Schult.), Miglio multifloro (*Oryzopsis miliacea* L.), Scilla marittima (*Urginea maritima* [L.] Stearn.).

Ed è proprio in queste pinete di Pino d'Aleppo, precisamente nella zona di Peschici, che il 24 Luglio del 2007, scoppia un devastante incendio, alimentato da un forte vento di Scirocco, che distrugge circa 550 ha, interessando aree del Parco Nazionale del Gargano e la Zona d'Interesse Comunitario (ZSC) di Manacore del Gargano (IT9110025) (fig.8).

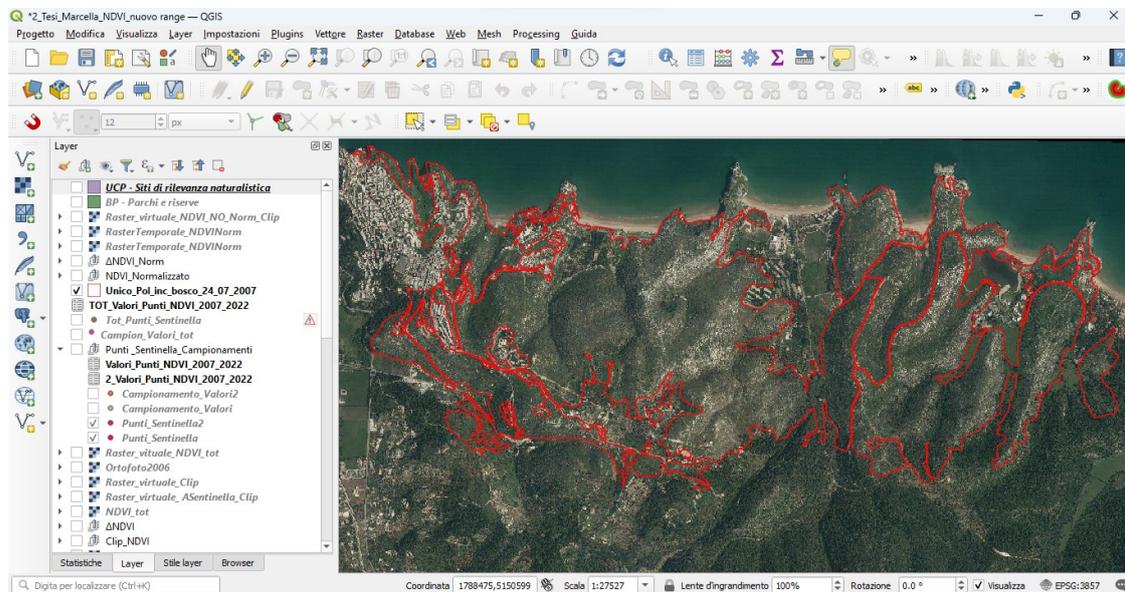


Figura 8: Area di studio oggetto dell'analisi dei dati telerilevati

Grazie all'utilizzo del telerilevamento, mediante le immagini satellitari del Landsat5 e del Landsat8, si è potuto studiare l'evoluzione vegetativa dell'area interessata dall'incendio, dal 2007 al 2022, attraverso gli indici di vegetazione NDVI e NBR.

2.2 IL TELERILEVAMENTO E LE IMMAGINI SATELLITARI UTILIZZATE PER LO STUDIO DEGLI INCENDI

Il termine *Telerilevamento*, detto anche *remote sensing*, deriva dall'unione di due parole 'tele', che in greco significa lontano, e 'rilevamento'. Quando si parla di telerilevamento si fa riferimento all'insieme di tecniche e metodologie utili ad acquisire a distanza e ad interpretare dati relativi a oggetti e fenomeni che avvengono sulla superficie terrestre (Dainelli, 2011), senza che vi sia alcun contatto diretto tra il sensore e l'oggetto dell'analisi.

Il *Telerilevamento* si basa su alcune caratteristiche fondamentali (Gomasasca, 2004), di seguito elencate:

- *la sinotticità*, grazie alla quale si osserva una porzione di territorio diversa rispetto a quella ottenibile dalle tecniche standard;
- *la ripetibilità*, che consente di effettuare osservazioni cicliche o periodiche grazie alle quali possono essere svolti confronti temporali;
- *l'aggiornabilità* dei dati raccolti.

L'elemento principale del telerilevamento è l'*energia elettromagnetica* (EEM), principalmente derivante dal sole. L'energia può essere trasferita da un corpo ad un altro in tre diversi modi, ovvero per *conduzione*, per *convezione* e per *radiazione*. A differenza dei primi due, che determinano il trasferimento di energia per contatto fra i corpi, la *radiazione* è l'unico modo in cui la propagazione di energia può avvenire anche attraverso il vuoto.

La *radiazione elettromagnetica*, infatti, secondo la teoria ondulatoria, "si propaga nello spazio come un'onda armonica che oscilla su due piani ortogonali fra loro e rispetto alla direzione di propagazione, rappresentanti il campo elettrico e quello magnetico generati dalla radiazione stessa" (Fig.9) (Dainelli l.c.).

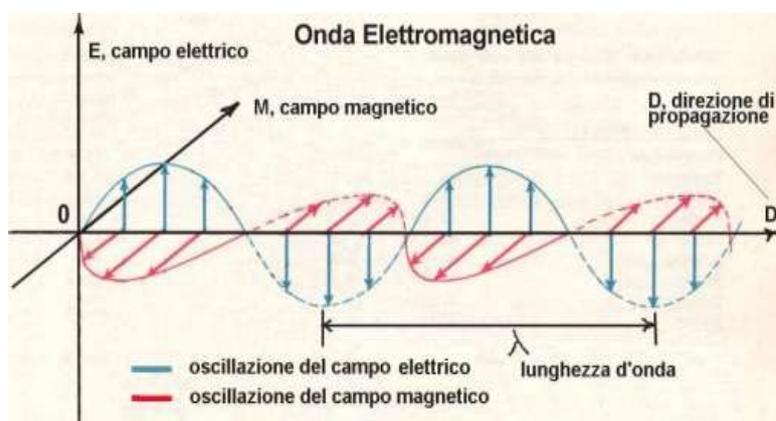


Figura 9: Schema di un'onda elettromagnetica con i piani verticali che rappresentano il campo elettrico e magnetico

Le due proprietà fondamentali di un campo elettromagnetico sono la *lunghezza d'onda* e la *frequenza*.

La *lunghezza d'onda* (λ) è la lunghezza tra i due picchi o le due depressioni dell'onda, calcolata in *micron* (μm); mentre l'altra grandezza caratteristica delle onde elettromagnetiche è la *frequenza* (ν), che rappresenta il numero di oscillazioni effettuate in un secondo, calcolata in *Hertz* (Hz).

Tra le altre proprietà del campo elettromagnetico ci sono il *periodo*, che indica il minimo intervallo di tempo dopo il quale l'onda si ripete, ed è una grandezza legata alla lunghezza d'onda; e l'*ampiezza* che è l'altezza di ogni picco della sinusoidale e rappresenta l'intensità del campo elettrico (Fig.10).



Figura 10: Schema di un'onda elettromagnetica

Tra la *frequenza* e la *lunghezza d'onda* esiste una relazione per la quale il loro prodotto è costante ed è pari alla velocità dell'onda stessa:

$$c = \lambda \nu \text{ (m/s)}$$

Il valore di tale velocità (c) è pari a 299.792.458 m/s ed è chiamata *velocità della luce nel vuoto*; la *frequenza* e la *lunghezza d'onda* sono inversamente proporzionali, all'aumentare dell'uno diminuisce l'altra e proprio da queste dipende il comportamento dell'onda elettromagnetica.

La luce oltre a propagarsi in maniera ondulatoria, secondo la *teoria dualistica*, si propaga anche attraverso particelle chiamati *fotoni*.

I *fotoni* sono dei pacchetti di energia definiti *quanti di energia* di tipo discreto che si muovono in modo ondulatorio. Per tale motivo la propagazione della luce può essere spiegata sia in termini ondulatori che in termini corpuscolari.

Secondo la *teoria quantistica* “la radiazione elettromagnetica è trasportata da unità discrete chiamate *fotoni* o *quanti*, ovvero particelle che trasmettono da una fonte ad un bersaglio

proprietà tipiche dei corpi quali energia e momento, ma senza possedere una massa. L'energia viene trasmessa non in maniera continua ma in pacchetti" (Dainelli l.c.).

L'insieme delle lunghezze e delle frequenze d'onda viene definito *spettro elettromagnetico*; esso è la rappresentazione di tutte le lunghezze d'onda su un asse suddivise in regioni, definite *bande spettrali*. Queste bande hanno confini puramente arbitrari, in quanto lo spettro è un *continuum* di lunghezze d'onda. Si hanno frequenze maggiori a sinistra che man mano tendono a diminuire andando verso destra; viceversa, le lunghezze d'onda saranno minori a sinistra e maggiori a destra (Fig.11).

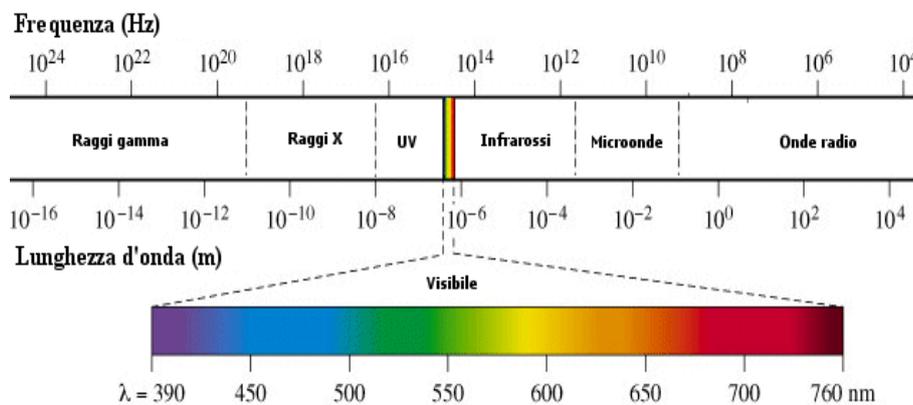


Figura 11: Lo spettro elettromagnetico

Le regioni più significative presenti nello spettro elettromagnetico sono i *raggi gamma*, i *raggi x*, l'*ultravioletto*, il *visibile*, l'*infrarosso*, le *microonde* e infine le *onde radio*.

L'unica regione di onde elettromagnetiche percepibile dall'occhio umano è quella del *visibile*, regione molto piccola che va dai *380nm* ai *750nm*. All'interno di questa regione sono presenti lunghezze d'onda che l'occhio umano percepisce come colori, che possono essere raggruppati in tre colori fondamentali:

- *Blu*: $\lambda = 380nm - 500nm$;
- *Verde*: $\lambda = 500nm - 600nm$;
- *Rosso*: $\lambda = 600nm - 750nm$.

Altra regione molto importante nel telerilevamento è l'*infrarosso*, che viene suddivisa in sottozone definite in base alla loro progressiva lontananza dal visibile e sono l'*infrarosso vicino (NIR)*, *medio (MIR)*, *lontano (TIR)* o *termico ed estremo (FIR)*.

Per disporre di dati telerilevati è necessario un sistema formato da un ambiente, in cui sono presenti gli oggetti da osservare o da monitorare, una fonte di luce, o meglio di energia elettromagnetica, che funge da mezzo di trasporto delle informazioni degli oggetti presenti

nell'ambiente, da un sensore, componente necessario per captare le radiazioni elettromagnetiche e infine da uno strumento che permette di interpretare le informazioni che arrivano al sensore per poi ottenere un prodotto: l'immagine satellitare o telerilevata (Fig.12).

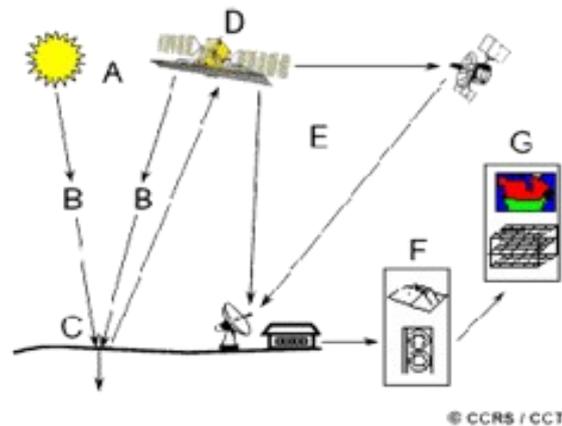


Figura 12: Il sistema di telerilevamento e le sue diverse componenti

La più importante sorgente presente in natura di energia elettromagnetica è il sole, anche se, è da precisare che, ogni elemento avente una temperatura superiore allo zero assoluto, emette energia elettromagnetica; quindi, anche la superficie terrestre emette radiazioni. L'EEM, prima di essere registrata dai sensori, passa attraverso l'atmosfera, l'effetto che l'atmosfera ha sulle radiazioni elettromagnetiche viene chiamato 'disturbo'. Di fatti l'atmosfera può determinare dei cambiamenti sull'intensità e sulla composizione spettrale della radiazione, captata dal sensore, attraverso due meccanismi la *diffusione* e l'*assorbimento*.

Durante la *diffusione* l'EEM, collidendo con le particelle presenti in atmosfera, viene dispersa in varie direzioni, in quanto interagisce con particelle più grandi delle lunghezze d'onda, determinando una diffusione di tipo non selettivo. Questo permette ai corpi atmosferici che contengono acqua, come le nuvole o la nebbia, di apparire bianchi o biancastri perché la presenza combinata di tutti i colori in eguali proporzioni produce una luce bianca. Mentre, l'*assorbimento atmosferico* è un meccanismo per il quale si ha un'effettiva perdita di energia delle radiazioni, si parla in questo caso di meccanismo selettivo, cioè un fenomeno che coinvolge solo determinate lunghezze d'onda. La presenza di gas in atmosfera, quali *vapore acqueo* (H_2O), *anidride carbonica* (CO_2) e *ozono* (O_3) determinano l'assorbimento di specifiche lunghezze d'onda dell'EEM solare (Dainelli l.c.).

Sono presenti degli intervalli di lunghezza d'onda in cui l'atmosfera è molto *trasmissiva* per l'EEM, che prendono il nome di *finestre atmosferiche* (Fig. 13).

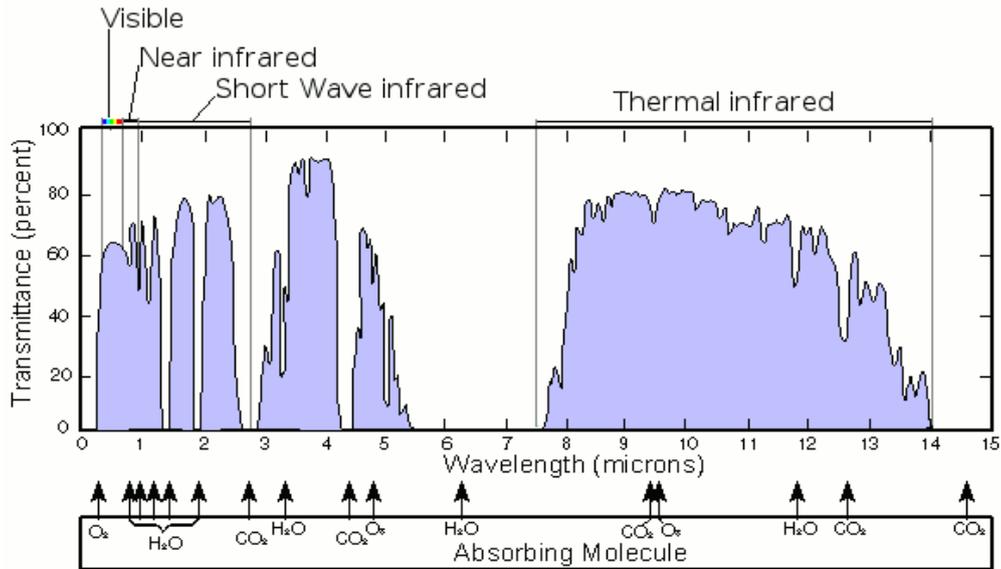


Figura 13: la trasmittanza atmosferica e finestre atmosferiche

Nella figura numero 13 è possibile osservare la *trasmittanza*, ovvero la quantità di energia, espressa in percentuale, che passa attraverso l'atmosfera in funzione delle lunghezze d'onda. I picchi nella curva, rilevano la presenza di *finestre di trasmissione atmosferica*, mentre nelle zone di depressione si ha il blocco della radiazione, a causa dei gas assorbenti presenti nell'atmosfera. Una volta oltrepassata l'atmosfera, le radiazioni solari incidenti arrivano sulla superficie terrestre e interagendo con essa, determinano 3 possibili fenomeni (Fig.14), che sono:

- la *riflessione*: parte della radiazione solare incidente viene riflessa dalla superficie terrestre;
- l'*assorbimento*: parte della radiazione solare incidente viene assorbita dalla superficie terrestre;
- la *trasmisione*: parte della radiazione solare incidente arriva sulla superficie terrestre, oltrepassando l'atmosfera, e viene trasmessa ad essa, attraversandola.

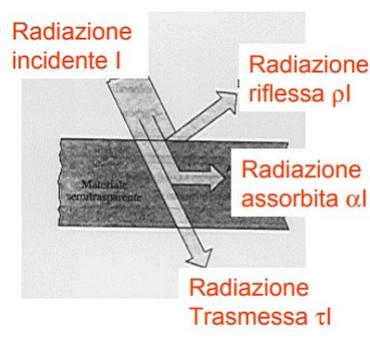


Figura 14: interazione della radiazione elettromagnetica incidente con la superficie terrestre

La radiazione riflessa è quella parte di radiazione incidente utile al telerilevamento, in quanto è proprio quella che viene captata dai sensori utilizzati per effettuare le osservazioni.

Il telerilevamento, in ambito forestale, fornisce informazioni di elevata qualità su media e grande scala per le aree percorse dal fuoco. Il passaggio del fuoco produce una risposta spettrale della vegetazione, alterando sia la struttura che la tessitura della stessa, facilmente visualizzabile dalle immagini satellitari. I segni del passaggio del fuoco su di essi persistono per tempi variabili, in base all'intensità dell'evento e al tipo di copertura vegetale presente nell'area.

È importante sottolineare come ogni corpo ha una precisa risposta alla radiazione incidente lungo tutto lo spettro elettromagnetico, ottenendo per ognuno di esso una univoca *firma spettrale*, differente a seconda che si tratti di suolo nudo, acqua, vegetazione, neve, etc. (Fig. 15).

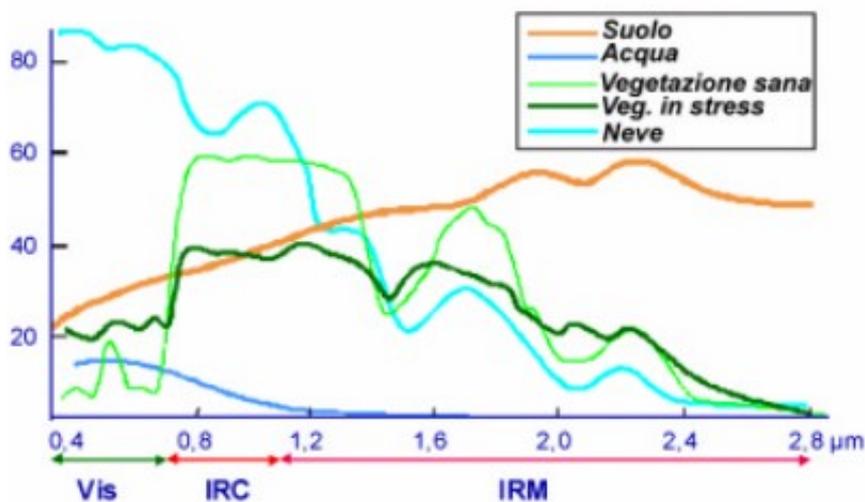


Figura 15: Le firme spettrali di alcuni tipi di elementi

Nella figura 15 è possibile osservare come le firme spettrali relative alla vegetazione assumono valori molto alti in corrispondenza dell'infrarosso vicino ($0.8\mu\text{m}$), in quanto proprio in questa regione le piante, grazie al loro processo fotosintetico, hanno la loro massima riflettanza. In realtà è presente anche un altro piccolo picco di riflettanza nella regione visibile del verde ($0.55\mu\text{m}$) ed è per questo che l'uomo riesce a percepire la colorazione verde della vegetazione. Si può osservare (fig.16) a riguardo come le risposte spettrali relative alla vegetazione sono fortemente influenzate dallo stato fenologico o da eventuali fenomeni di disturbo (es. incendi), che modificano le superfici fogliari e quindi le capacità di riflessione dell'energia elettromagnetica.

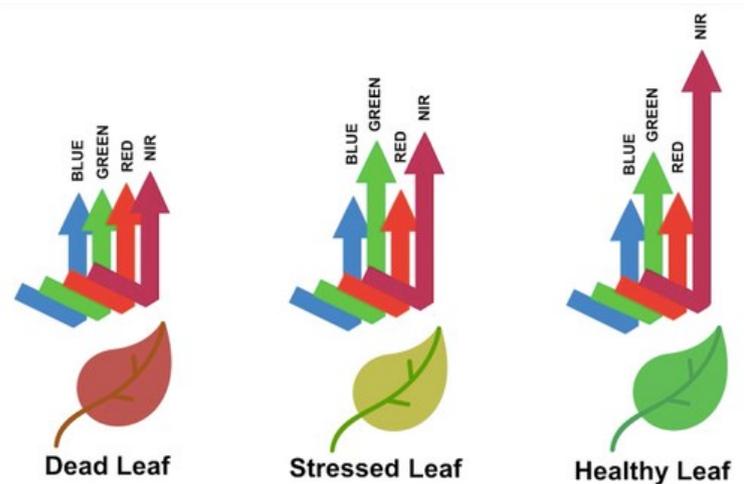


Figura 16: Risposta spettrale della vegetazione in base al suo stato di salute
[fonte: <https://www.regrow.aq>]

La capacità di riflessione della vegetazione è regolata da tre fattori che sono i *pigmenti fotosintetici*, la *struttura fogliare* e il *contenuto idrico*. La combinazione di questi tre elementi consente di identificare firme spettrali caratteristiche delle varie composizioni vegetazionali, permettendo altresì di riconoscere lo stato di salute delle comunità vegetali, eventuali stress idrici etc.

I *pigmenti fogliari* sono responsabili dell'assorbimento della luce nella banda del blu e del rosso, prevalentemente attraverso la Clorofilla a e b, e hanno un massimo di riflettività nella regione del verde.

La *struttura fogliare* è, invece, la responsabile della riflettanza nella regione dell'infrarosso, in particolare nel NIR. Infatti, la radiazione infrarossa non interagisce con i pigmenti fotosintetici bensì è influenzata dalla complessità morfologica della struttura fogliare, in particolare l'area del mesofillo, ovvero quello strato fogliare che è situato tra i due strati dell'epidermide della foglia, superiore ed inferiore.

Poiché il mesofillo è anche funzione di una serie di caratteristiche della pianta come lo stato di salute, lo stato fenologico, la specie, la varietà, è possibile identificare le varie specie o anche altre caratteristiche, attraverso rapporti tra lunghezze d'onda differenti, osservando la curva di riflettanza nella banda dell'infrarosso vicino.

Aumentando la lunghezza d'onda, e quindi entrando nell'infrarosso a onde corte (SWIR) [1.35 a 2.70 μm], le proprietà spettrali della vegetazione dipendono dal tenore dell'acqua della foglia, che provoca assorbimenti e riflessioni caratteristiche.

Quindi il comportamento spettrale della vegetazione nella regione dello SWIR può essere utilizzato per valutare lo stress idrico delle piante.

La firma spettrale delle piante verdi è distintiva, in quanto la clorofilla, nelle piante in crescita, assorbe luce nel visibile, soprattutto rossa, perché utilizzata nella fotosintesi; invece, nell'infrarosso vicino, la luce viene riflessa molto efficacemente, in quanto non serve alla pianta. Questo permette alle piante di evitare un riscaldamento eccessivo e la perdita di linfa per evaporazione.

L'osservazione della Terra avviene attraverso l'utilizzo di diverse tipologie di strumenti, chiamati *sensori*, che vengono montati su supporti chiamati *piattaforme*.

I sensori possono essere di due tipi: *passivi* o *attivi*.

I sensori *passivi* registrano, nella maggior parte dei casi, l'energia solare che viene riflessa dalla superficie terrestre; ciò implica che il loro funzionamento sia vincolato alla presenza del sole; se il cielo dovesse essere coperto da nuvole, ad esempio, captando i sensori solo energia riflessa, sarebbe impossibile l'osservazione della superficie sottostante. Pur presentando questa difficoltà, i sensori ottici passivi sono quelli più utilizzati per l'osservazione della Terra, soprattutto perché operano nel campo del visibile e dell'infrarosso.

A differenza dei passivi, i sensori *attivi* generano essi stessi la radiazione che viene inviata sulla superficie terrestre e successivamente registrata. Questi sensori possono operare anche in assenza di energia solare, oltre che a poter registrare immagini in caso di copertura nuvolosa, poiché le lunghezze d'onda del segnale emesso sono piuttosto grandi (microonde) rispetto alle particelle di vapore acqueo, pertanto non vengono ostacolate dall'atmosfera. Tra i sensori attivi ci sono il *Radar* (Radio Detection And Ranging) o il *Lidar* (Light Detection And Ranging), quest'ultimo però opera esclusivamente nel campo compreso tra ultravioletto e l'infrarosso vicino.

I sensori per il telerilevamento presentano una caratteristica ben specifica definita *risoluzione*, che viene distinta in quattro tipologie differenti, che sono:

-*Risoluzione geometrica o spaziale;*

-*Risoluzione spettrale;*

-*Risoluzione radiometrica;*

-*Risoluzione temporale.*

La *risoluzione geometrica* o *spaziale* è stabilita dalle dimensioni dell'area elementare al suolo, che viene rilevata dalle radiazioni elettromagnetiche riflesse. Ogni area elementare viene rappresentata da pixel o celle all'interno dell'immagine generata dal sensore ed è proprio la matrice dei pixel che costituisce l'immagine stessa. Nella cella viene registrato il singolo valore di *Digital Number (DN)* che rappresenta il valore di radianza arrivato al sensore dagli elementi dell'area ripresa, e in maniera limitata, anche da quelli vicini. Più cresce la dimensione del pixel

in metri, più l'immagine avrà una risoluzione spaziale più bassa; viceversa più diminuisce la grandezza del pixel, maggiore sarà la risoluzione.

La *risoluzione spettrale* rileva l'intervallo di lunghezza d'onda a cui lo strumento è sensibile. Ogni sensore può risultare sensibile a determinate zone, denominate *bande* dello spettro elettromagnetico; quindi, un sensore può essere sensibile a più bande spettrali. Per tale motivo quando un sensore avrà un'alta risoluzione spettrale, vorrà dire che sarà caratterizzato da un alto numero di bande spettrali.

Quei sensori in grado di registrare le radiazioni EM in numerosi intervalli spettrali vengono chiamati *sensori multispettrali* (da quattro a quattordici canali); se invece si arriva a raggiungere le centinaia di bande si chiamano *sensori iperspettrali*.

La *risoluzione radiometrica*, invece, rappresenta la quantità di energia minima necessaria per far sì che il sensore generi un segnale elettrico codificabile in un DN. Maggiore è la risoluzione radiometrica, maggiore sarà la capacità del sensore nel registrare piccole differenze di energia. Per la conversione dei segnali elettrici analogici in digitale, viene usato un sistema di codifica binario, dove i DN usati per rappresentare la gamma di differenza radiometrica è determinata da 2^Q e Q è il numero di *bit* usati per la codifica. Questo determina che più alto è Q, più saranno numerosi i DN e più alta sarà la risoluzione radiometrica, facendo sì che l'immagine digitale si avvicini più alla realtà.

La *risoluzione temporale*, infine, è la capacità del sensore di riuscire a rilevare una stessa porzione di superficie con una cadenza regolare, in base alla programmazione dell'orbita della piattaforma. Il lasso di tempo che intercorre tra due riprese successive della stessa area prende il nome di *tempo di rivisitazione* (Dainelli l.c.).

Le piattaforme su cui vengono installati i sensori, utilizzate nel telerilevamento, si suddividono in:

- *Piattaforme al suolo*, rappresentate da sistemi di osservazione a distanza, ma sempre vincolati alla superficie terrestre; solitamente vengono montati i sensori su veicoli con un braccio sollevabile (spettrometri), utili a determinare le firme elettromagnetiche delle superfici, per la taratura delle immagini satellitari.

Con questi sistemi si può arrivare ad altezza dal suolo di circa 15m.

- *Piattaforme aeree*, costituite da aeroplani, elicotteri e palloni aerostatici.

Queste piattaforme operano tra i 300m e i 20km.

- *Piattaforme satellitari*, costituite da satelliti che orbitano intorno alla Terra. Queste piattaforme oggi, vengono molto utilizzate, poiché presentano tempi di rivisitazione di uno stesso luogo della superficie terrestre molto breve, permettendo di osservare l'andamento di alcuni fenomeni in maniera relativamente rapida.

Solitamente i satelliti operano a quote comprese tra i 450 e i 900km di altezza.

Recentemente si è diffuso l'utilizzo di sensori su aeromobili a pilotaggio remoto e droni, che consentono di ottenere immagini ad alta risoluzione, operando a quote comprese tra i 20m e i 250m dal suolo.

Nell'orbita terrestre come è stato detto in precedenza sono presenti diverse piattaforme satellitari che permettono la registrazione delle immagini da parte dei sensori.

Le missioni Landsat partono dal 1972 con una serie di satelliti, prodotti dalla NASA, che permettono, ancora oggi, il continuo aggiornamento di immagini della superficie terrestre, con risoluzioni spaziali variabili a seconda della banda considerata, fornendo dati utili per la gestione del territorio e per poter prendere decisioni importanti sulla gestione dell'ambiente e delle risorse naturali.

Per l'elaborazione della tesi sono state utilizzate, in particolare, le immagini satellitari del Landsat 5, ormai dismesso, e quelle relative al Landsat 8, attualmente ancora operativo.

Il satellite Landsat 5, sviluppato dalla NASA, ha iniziato la sua missione il 1 marzo del 1984. I sensori presenti sulla piattaforma erano il Multispectral Scanner (MSS) e il Thematic Mapper (TM). La sua missione è durata 29 anni, fino a quando il 5 giugno del 2013 è stato disattivato. L'orbita operativa distava dalla terra 705 km ed era sincrona al Sole, quasi-polare. Effettuava il giro del globo in 99 minuti, quindi eseguiva 14 orbite al giorno, con una *risoluzione temporale* pari a 16 giorni, una *risoluzione radiometrica* di 8 bit e una *risoluzione spaziale* compresa tra 30m e 120m.

Il sensore del Landsat 5 consentiva di acquisire 7 bande spettrali, compresa quella termica, di seguito elencate:

- Banda 1 Blu visibile (0,45 - 0,52 μm);
- Banda 2 Verde visibile (0,52 - 0,60 μm);
- Banda 3 Rosso visibile (0,63 - 0,69 μm);
- Banda 4 Vicino infrarosso (0,76 - 0,90 μm);

- Banda 5 Vicino infrarosso (1,55 - 1,75 μm);
- Banda 6 termica (10,40 - 12,50 μm);
- Banda 7 Medio infrarosso (2,08 - 2,35 μm).

In particolare tutte le bande considerate hanno una risoluzione spaziale pari a 30m, eccetto quella termica con una risoluzione di 120m.

Il satellite Landsat 8, invece, è stato lanciato l'11 febbraio del 2013; esso trasporta come sensori l'Operational Land Imager (OLI) e il Thermal Infrared Sensor (TRIS).

Il primo sensore, l'OLI, misura nel visibile, NIR e SWIR; mentre il TRIS misura la temperatura della superficie terrestre. Esso opera attorno alla Terra con un'orbita sincrona al Sole, quasi-polare, ad una distanza di 705km, compiendo il giro completo in 99 minuti, anche il Landsat 8 ha una risoluzione temporale pari a 16 giorni. In totale presenta 11 bande, di seguito elencate:

- Banda 1 Aerosol costiero (0,43 - 0,45 μm);
- Banda 2 Blu (0,450 - 0,51 μm);
- Banda 3 Verde (0,53 - 0,59 μm);
- Banda 4 Rosso (0,64 - 0,67 μm);
- Banda 5 Vicino infrarosso (0,85 - 0,88 μm);
- Banda 6 SWIR 1 (1,57 - 1,65 μm);
- Banda 7 SWIR 2 (2,11 - 2,29 μm);
- Banda 8 Pancromatico (PAN) (0,50 - 0,68 μm);
- Banda 9 Cirri (1,36 - 1,38 μm);
- Banda 10 TIRS 1 (10,6 - 11,19 μm);
- Banda 11 TIRS 2 (11,5 - 12,51 μm).

Le bande spettrali dalla 1 alla 9, hanno una risoluzione spaziale di 30m, la banda 8, di 15m, mentre le due bande termiche, di 100m (USGS site: <https://www.usgs.gov/>).

È possibile scaricare le immagini satellitari, per effettuare studi e verifiche sui diversi processi dinamici vegetativi dei vari ecosistemi, attraverso diversi portali, come ad esempio il portale *Sentinel hub EO Browser* (<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=10&lat=41.9&lng=12.5&themeId=DEFAULT-THEME&toTime=2023-07-21T11%3A22%3A39.094Z>) oppure il portale dell'agenzia governativa statunitense *United States Geological Survey* (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) che danno la possibilità di poter usufruire di dati e immagini in modo gratuito (fig.17).

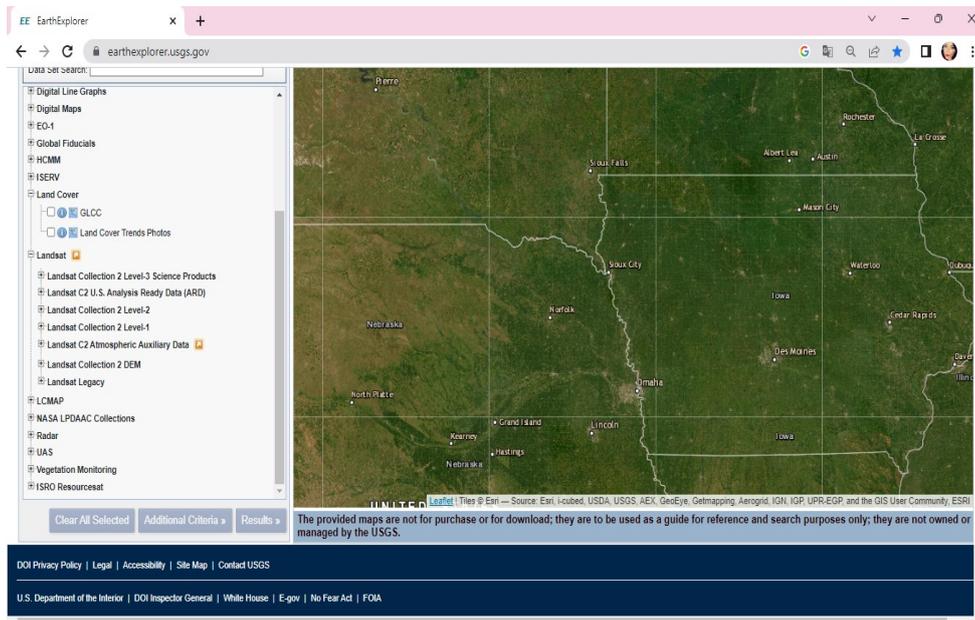


Figura 17: Portale web USGS

Dopo la prima fase di registrazione, dal portale possono essere scaricati i dataset delle immagini satellitari relative all'area, oggetto di studio.

2.3 GLI INDICI NORMALIZZATI DI VEGETAZIONE UTILIZZATI PER LO STUDIO DELLE AREE PERCORSE DAL FUOCO

Oggi, in campo forestale, risulta indispensabile l'utilizzo del telerilevamento in quanto, grazie ad esso, si può monitorare la gestione delle risorse forestali e determinare la pianificazione forestale e ambientale, oltre che effettuare analisi e studi relativi ai processi dinamici. Con il telerilevamento in campo forestale, si può operare su diverse scale, da quella globale fino ad arrivare a quella locale, per la gestione di singole proprietà forestali.

Per effettuare elaborazioni determinanti risultati di carattere qualitativo migliori, che permettono una maggiore possibilità di interpretazione delle immagini telerilevate, vengono utilizzati specifici indici che mettono in relazione le diverse bande spettrali disponibili, particolarmente utili in ambito forestale per l'esame o l'analisi delle aree percorse dal fuoco, nonché per l'interpretazione dei processi dinamici post incendio. Il calcolo di questi indici può essere effettuato sia su singole bande che su immagini multibanda.

Vengono utilizzati soprattutto indici che permettono di individuare la differente risposta spettrale delle bande del rosso e dell'infrarosso, ad esempio per evidenziare lo stato vegetativo delle piante. Il salto di riflettanza che si ha nella vegetazione sana, passando dal rosso (nel quale vi è un forte assorbimento delle radiazioni) all'infrarosso (dove si ha una forte riflettanza delle radiazioni), prende il nome di *RED EDGE* (fig.18).

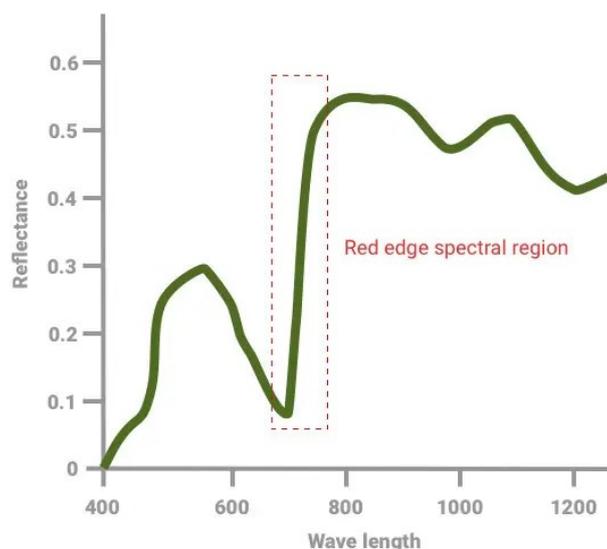


Figura 18: Regione spettrale del RED EDGE
[Fonte: <https://aario.app>]

Gli indici possono essere legati direttamente o indirettamente alla vegetazione ed evidenziano informazioni su di essa; tra i più utilizzati abbiamo l'NDVI e l'NBR.

Il Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) è l'indice più noto legato alla vegetazione ed è un indice che determina un'immagine risultante dal rapporto normalizzato delle bande NIR (Near InfraRed) e Red, attraverso il quale vengono stimate densità e grado di copertura della vegetazione oltre ad altre informazioni riguardanti lo stato vegetativo:

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

Può assumere valori fra -1 e +1 e restituisce un'immagine in toni del grigio con valori numerici del pixel di tipo reale. Solitamente l'immagine viene successivamente visualizzata a pseudocolori, scegliendo una scala cromatica, per poter interpretare al meglio l'immagine. Pur avendo un range di valori che può andare da -1 a +1, solitamente non assume mai valori estremi; in presenza di vegetazione assumerà valori che vanno da 0.2 a 0.8, aumentando all'aumentare della densità; mentre in zone prive di vegetazione presenterà valori prevalentemente negativi (Dainelli l.c.).

Successivamente viene calcolato il $\Delta NDVI$, andando a effettuare la differenza tra il post e il pre NDVI, attraverso la seguente formula:

$$\Delta NDVI = PostNDVI - PreNDVI$$

Nella seguente tabella n. 3 vengono riportati tutti i valori relativi al $\Delta NDVI$.

NDVI	INTERPRETAZIONE
< 0.1	Suolo nudo o nuvole
0.1 – 0.2	Copertura vegetale quasi assente
0.2 – 0.3	Copertura vegetale molto bassa
0.3 – 0.4	Copertura vegetale bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0.4 – 0.5	Copertura vegetale medio-bassa con vigoria bassa o copertura vegetale molto bassa con vigoria alta
0.5 – 0.6	Copertura vegetale media con vigoria bassa o copertura vegetale medio-bassa con vigoria alta
0.6 – 0.7	Copertura vegetale medio-alta con vigoria bassa o copertura vegetale media con vigoria alta

0.7 – 0.8	Copertura vegetale alta con vigoria alta
0.8 – 0.9	Copertura vegetale molto alta con vigoria molto alta
0.9 – 1.0	Copertura vegetale totale con vigoria molto alta

Tabella 3: Valori di $\Delta NDVI$

Un altro indice molto utilizzato, soprattutto a seguito di incendi boschivi, è il Normalized Burn Ratio (NBR) che serve ad individuare le aree bruciate e la gravità dell'evento che si è verificato. Questo indice viene calcolato tramite il rapporto tra le bande dello SWIR (Short Wavelength InfraRed) e NIR (Near InfraRed):

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$$

La vegetazione sana tende a mostrare, nello spettro elettromagnetico, una riflettanza elevata nel NIR e bassa nello SWIR. Risulta un comportamento completamente opposto quando si analizzano aree percorse dal fuoco; infatti, aree recentemente bruciate tendono a presentare una riflettanza bassa nel NIR e alta nello SWIR (fig.19).

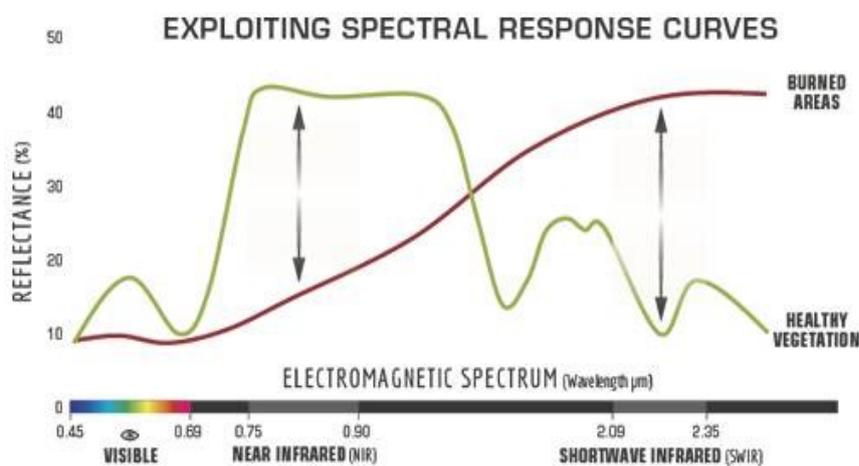


Figura19: Confronto della risposta spettrale di vegetazione sana e aree bruciate.

[Fonte: <https://un-spider.org/>]

Successivamente, si effettua la differenza tra i valori di NBR pre e post incendio in modo da ottenere il ΔNBR , che potrà essere utilizzato per stimare la gravità dell'incendio. Più il valore del ΔNBR sarà alto, maggiore sarà la gravità dell'incendio, mentre le aree con valori negativi di ΔNBR , indicheranno zone di rigenerazione a seguito di un incendio. Quindi il ΔNBR sarà calcolato nel seguente modo:

$$\Delta NBR = PreFireNBR - PostFireNBR$$

Nella seguente tabella n. 4 vengono riportati tutti i valori relativi al ΔNBR .

	ΔNBR	Gravità incendio
	- 0.500 a -0.251	Alto tasso di rinnovazione post-incendio
	- 0.250 a - 0.101	Basso tasso di rinnovazione post-incendio
	- 0.100 a + 0.099	Incombusto
	+ 0.100 a + 0.269	Bassa gravità
	+ 0.270 a + 0.439	Gravità moderata – bassa
	+ 0.440 a + 0.659	Gravità moderata - elevata
	+ 0.660 a +1.300	Elevato impatto dell'incendio

Tabella 4: livelli di gravità del ΔNBR [Forte: <https://un-spider.org/>]

2.4 COSTITUZIONE DEL DATASET E PROCEDURE DI ELABORAZIONE DEGLI INDICI NORMALIZZATI IN AMBIENTE GIS

La presente tesi ha come scopo quello di studiare i vari processi dinamici avvenuti all'interno della pineta di Pino d'Aleppo nella zona di Peschici, a seguito del devastante incendio del 24 luglio 2007, attraverso l'utilizzo di immagini satellitari e di indici di vegetazione normalizzati (Dainelli l. c.).

Per prima cosa è stata individuata la zona del Gargano interessata dall'incendio, attraverso l'uso di immagini satellitari per definire e per identificare l'area di studio e quindi le dimensioni e l'entità dell'evento. Le prime immagini utilizzate per identificare in ambiente GIS (*Geographic Information System*) l'area percorsa dal fuoco sono state quelle presenti nei database dalla piattaforma Google Earth Pro, ripercorrendo l'arco temporale dal 2006 (pre-evento) al 2019 (fig.20, 21, 22, 23).

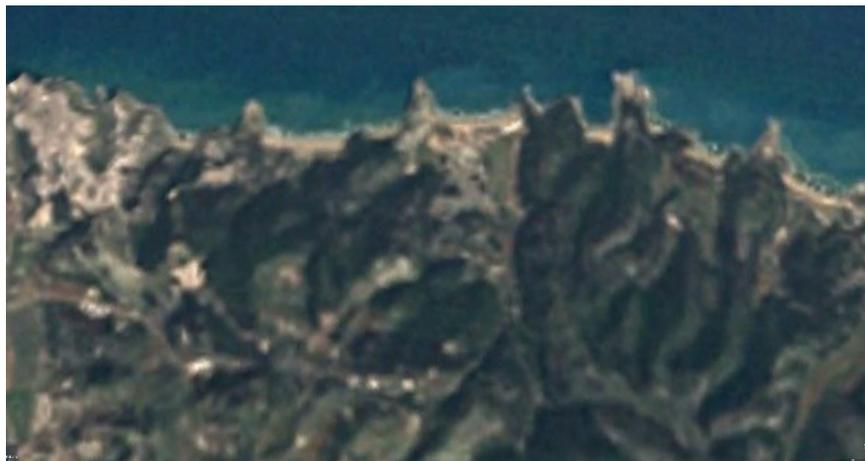


Figura 20: immagine satellitare scattata a Gennaio del 2006 (Pre incendio)

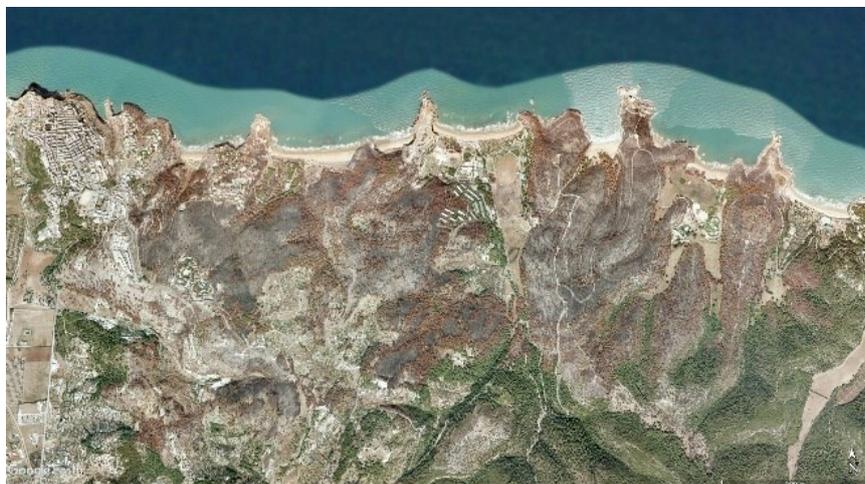


Figura 21: immagine satellitare scattata a Settembre del 2007 (Post incendio)



Figura 22: immagine satellitare scattata a Giugno del 2013

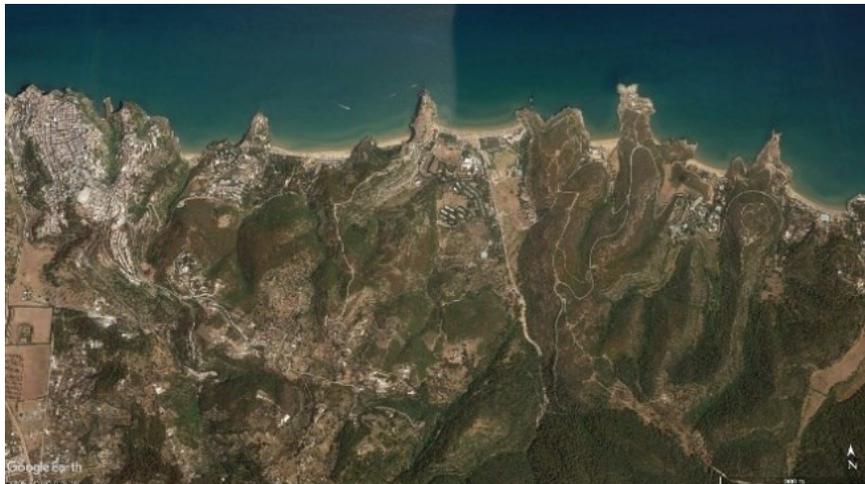


Figura 23: immagine satellitare scattata a Luglio del 2019

Come è possibile osservare dalle immagini, a seguito dell'incendio, c'è stato un notevole impatto sulla vegetazione forestale i cui effetti si sono protratti per tutti gli anni successivi.

Identificata l'area, estesa su circa 550 ha, sono state scaricate le immagini multispettrali dal portale dell'Istituto Geologico degli Stati Uniti (USGS), andando a selezionare e scaricare, gratuitamente, le immagini satellitari relative al caso studio impostando un limite di copertura nuvolosa pari al 30%.

Per gli anni che vanno dal 2007 al 2011, sono state scaricate le immagini satellitari relative alle bande 3 (Red), 4 (NIR) e 5 (SWIR) del satellite Landsat 5, dismesso poi nel 2012, aventi una risoluzione spaziale pari a 30 m, mentre dal 2013 al 2022, le immagini scaricate per le elaborazioni sono quelle relative alle bande 4 (RED), 5(NIR) e 7 (SWIR 2) e provengono da un altro satellite, il Landsat 8, entrato in funzione dal 2013 ed ancora oggi orbitante; anche in questo caso le immagini relative alle bande scaricate presentano una risoluzione spaziale pari a 30 m.

Sono state scaricate in totale 17 immagini relative alle bande sopra citate, che sono state utilizzate nel calcolo degli indici (tab.5).

Satellite	Data Immagine	Nome Immagine	Bande utilizzate
Landsat 5	08/04/2007	LT05_L2SP_189031_20070408_20200830_02_T1	3, 4, 5
Landsat 5	06/07/2007	LT05_L2SP_188031_20070706_20200830_02_T1	3, 4, 5
Landsat 5	29/07/2007	LT05_L2SP_189031_20070729_20211210_02_T1	3, 4, 5
Landsat 5	08/07/2008	LT05_L2SP_188031_20080708_20200829_02_T1	3, 4, 5
Landsat 5	27/07/2009	LT05_L2SP_188031_20090727_20200827_02_T1	3, 4, 5
Landsat 5	22/08/2010	LT05_L2SP_189031_20100822_20200823_02_T1	3, 4, 5
Landsat 5	18/08/2011	LT05_L2SP_188031_20110818_20200820_02_T1	3, 4, 5
Landsat 8	06/07/2013	LC08_L2SP_188031_20130706_20200912_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	10/08/2014	LC08_L2SP_188031_20140810_20200911_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	12/07/2015	LC08_L2SP_188031_20150712_20200908_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	30/07/2016	LC08_L2SP_188031_20160730_20200906_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	02/08/2017	LC08_L2SP_188031_20170802_20200903_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	20/07/2018	LC08_L2SP_188031_20180720_20200831_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	07/07/2019	LC08_L2SP_188031_20190707_20200827_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	26/08/2020	LC08_L2SP_188031_20200826_20200905_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	13/08/2021	LC08_L2SP_188031_20210813_20210819_02_T1	4, 5, 7
Landsat 8	15/07/2022	LC08_L2SP_188031_20220715_20220726_02_T1	4, 5, 7

Tabella 5: Elenco delle immagini satellitari scaricate con le relative bande

Le immagini scaricate sono di *livello 2*, ovvero sono immagini che hanno subito una prima elaborazione, tale da determinarne un miglioramento, attraverso la correzione del disturbo provocato dall'atmosfera, oltre che dall'angolo solare e dalla topografia.

È importante segnalare l'assenza di immagini riferite all'anno 2012 nelle elaborazioni, poiché sia il satellite *Landsat 5* che il *Landsat 8* per il periodo luglio – agosto non presentano nei loro archivi immagini satellitari con una copertura nuvolosa inferiore al 30% della zona oggetto di studio. Si è provato a introdurre immagini del 2012 utilizzando immagini del Landsat7, ma queste presentavano anomalie al loro interno, che non avrebbero portato ad un'analisi accurata degli indici. Per tale motivo, dalle elaborazioni si è deciso di omettere immagini riferite all'anno 2012.

L'elaborazione dei dati è stata effettuata in ambiente GIS, utilizzando il software open QGIS nella versione 3.18, attraverso il quale sono state elaborate le immagini satellitari e calcolati gli indici di vegetazione (Noti, 2021).

Ulteriori strati informativi utilizzati per le indagini preliminari sono quelli della *Carta della vegetazione forestale* e gli altri relativi alle *Perimetrazione delle aree percorse dal fuoco*, questi ultimi relativi agli eventi avvenuti nel periodo compreso fra il 2000 e il 2020. Tali dati, in formato vettoriale sono stati forniti dalla Protezione Civile della Regione Puglia a seguito di specifica richiesta.

I dati desunti dagli strati informativi precedentemente citati identificano i vari tipi forestali e delimitano la zona dell'evento su cui è stata effettuata l'elaborazione degli indici.

Per identificare l'area sono stati acquisiti ulteriori dati disponibili nel Sistema Informativo Territoriale della Regione Puglia (SIT), dal quale è stato possibile ottenere il *Grigliato cartografico 1:5000* della Puglia, utile a identificare i fogli della zona del Gargano in cui è avvenuto l'incendio (fig.24).

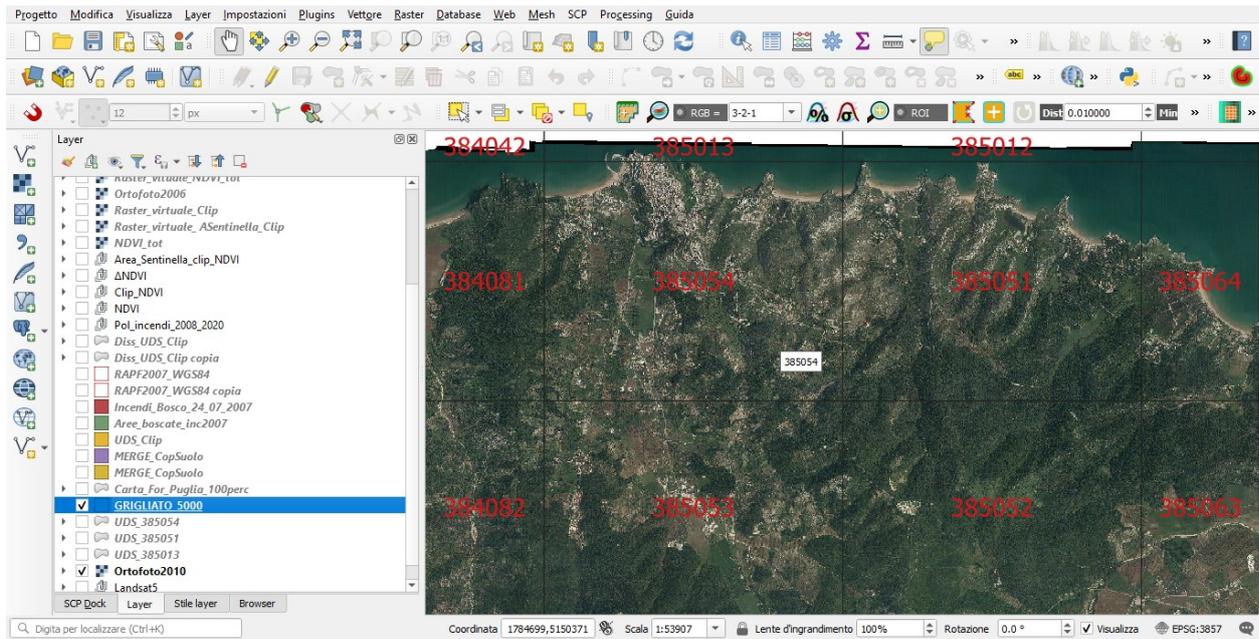


Figura 24: immagine QGIS in cui si possono osservare i fogli di grigliato interessati dall'area dell'incendio

Successivamente, sempre dal SIT sono stati scaricati i fogli 385051, 385054 e 385013 (fig. 25) del grigliato riferiti all'Uso del Suolo della zona di Vieste (n. 385), interessata dall'incendio.

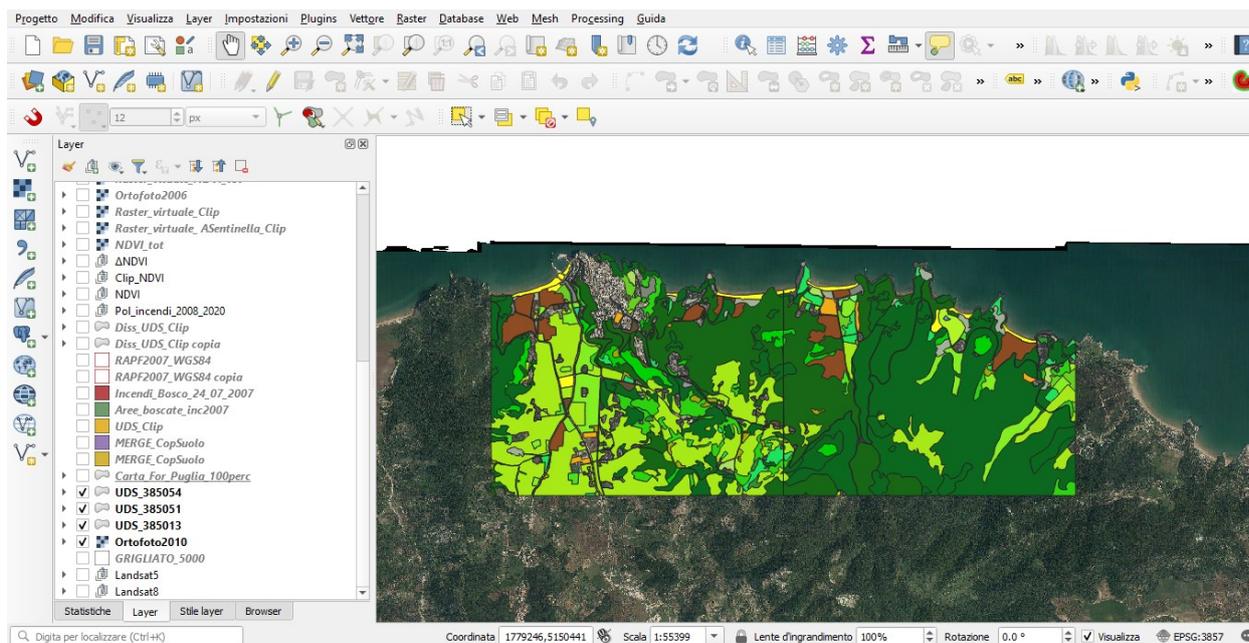


Figura 25: Fogli Uds della zona di Vieste

Dal layer degli incendi del 2007 è stata individuata il poligono in cui è avvenuto l'evento del 24 luglio 2007 ed è stato accertato che tale area non sia stata interessata da altri incendi per il periodo dal 2008 al 2020.

Si fa rilevare che, pur non avendo i layer dei poligoni degli incendi riferiti agli anni 2021 e 2022, è stata effettuata comunque l'analisi degli indici anche per quei due anni.

Per conoscere le dimensioni dell'area percorsa durante l'evento è stato effettuato un clip tra il layer degli incendi avvenuti nel 2007 e l'UdS del 2006 scaricato dal SIT Puglia, ottenendo così un nuovo layer dal quale è stato possibile determinare i diversi tipi di copertura del suolo compresi nell'area dell'evento.

Si è preferito utilizzare la carta dell'UdS del 2006 rispetto al layer fornito dalla regione dei *Tipi forestali*, poiché quest'ultima, aggiornata al 2011 (data posteriore all'evento), poteva aver subito cambiamenti notevoli nell'identificazione dei tipi di copertura nelle aree in cui è avvenuto l'incendio.

Per determinare il danno subito dalla vegetazione colpita dall'incendio e verificare come questa abbia reagito all'evento nel corso degli anni successivi, sono stati utilizzati degli indici della vegetazione comunemente utilizzati in ambito forestale. Il primo è l'NDVI, legato allo stato vegetativo, alla presenza di biomassa e a quanto la vegetazione risulta essere sana; il secondo è l'NBR, legato agli incendi boschivi, utilizzato per determinare quanto siano vaste le aree interessate dal fuoco e quanto sia alta la gravità dell'evento.

Si è passati a calcolare gli indici NDVI e NBR per gli anni che vanno dal 2007 al 2022, utilizzando il *Calcolatore Raster* di QGIS.

Le formule utilizzate sono le seguenti:

- per l'NDVI:

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

Per le immagini del satellite Landsat 5 sono state utilizzate per le bande RED e NIR, rispettivamente le bande n. 3 e 4;

Per le immagini del satellite Landsat 8 sono state utilizzate per le bande RED e NIR, rispettivamente le bande n. 4 e 5.

È stato così calcolato l'NDVI per tutti gli anni che vanno dal 2007 (pre-evento) al 2022 (fig.26).

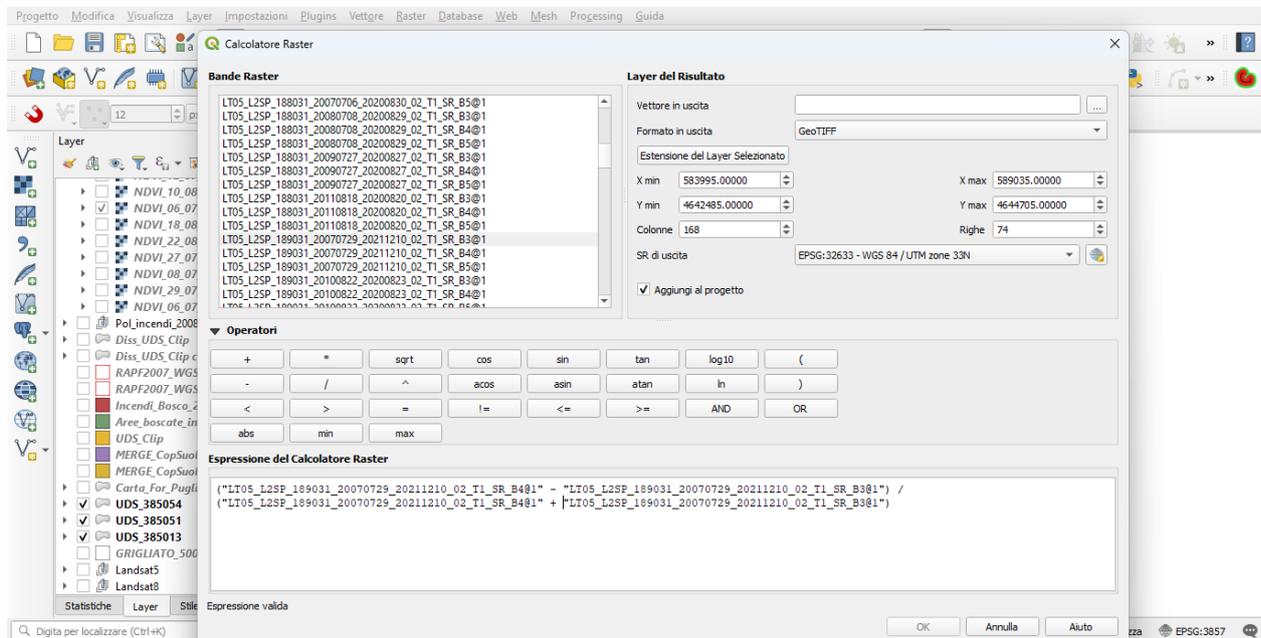


Figura 26: Calcolatore Raster: calcolo dell'NDVI

- per l'NBR:

$$NBR = \frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)}$$

Per le immagini del satellite Landsat 5 sono state utilizzate per le bande NIR e SWIR, rispettivamente le bande n. 4 e 5;

Per le immagini del satellite Landsat 8 sono state utilizzate per le bande NIR e SWIR, rispettivamente le bande n. 5 e 7.

È stato così calcolato l'NBR per tutti gli anni che vanno dal 2007 (pre-evento) al 2022 (fig.27).

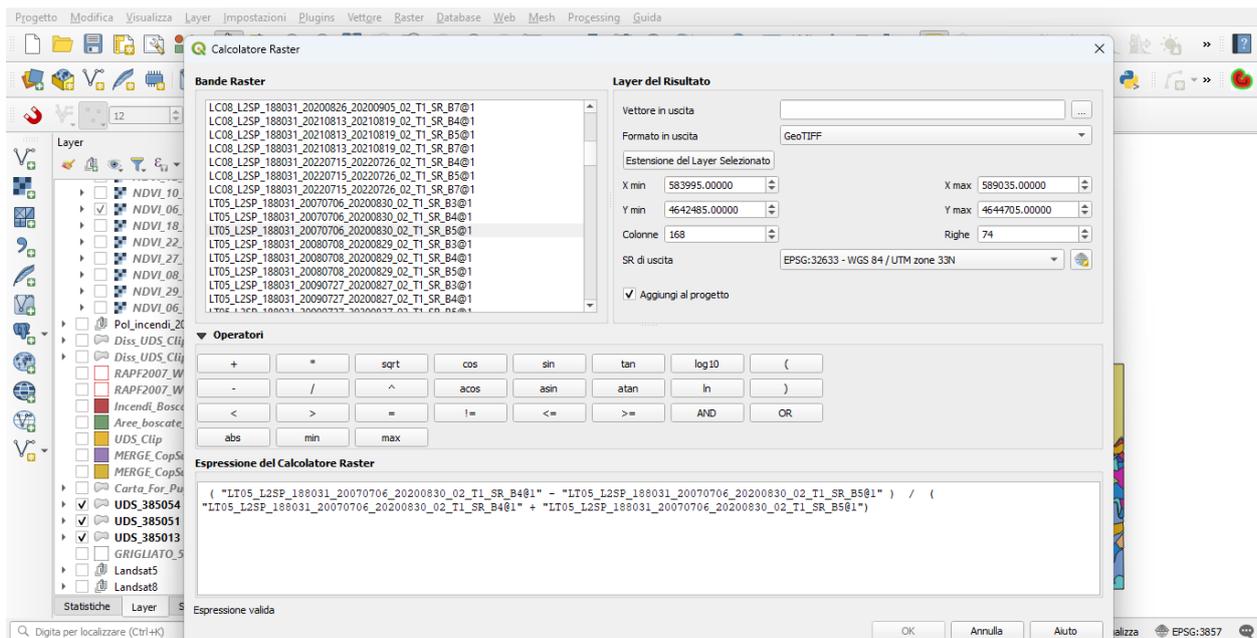


Figura 27: Calcolatore Raster: calcolo dell'NBR

L'utilizzo di due satelliti, con sensibilità della strumentazione differente, ha necessariamente previsto l'individuazione di *aree sentinella*, per un totale di 40 punti. La maggior parte di questi è stata individuata nelle vicinanze dell'area interessata dall'evento, un secondo gruppo di 10 punti, è stato selezionato all'interno del SIC di Pineta Marzini (IT9110016), nel quale sono comprese pinete di Pino d'Aleppo estese su circa 1500 ha (fig.28).

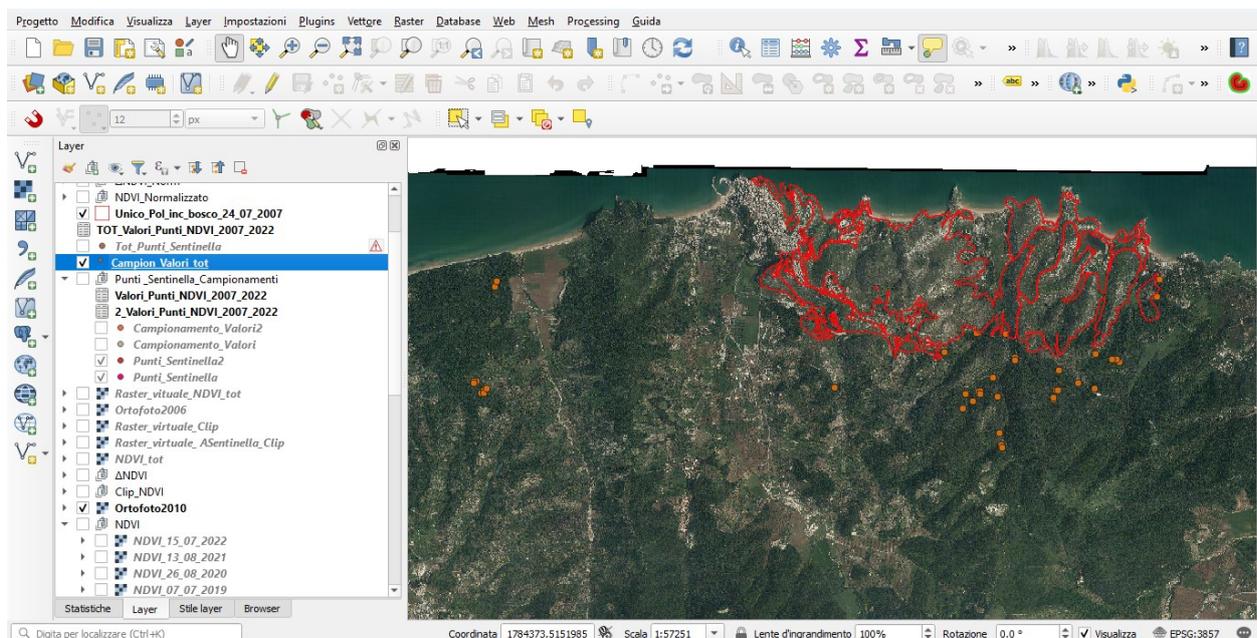


Figura 28: Punti sentinella individuati

I punti individuati hanno permesso di calcolare, i valori *medi, mediani* e di *deviazione standard* degli indici di NDVI e NBR, sia temporali che spaziali, per i diversi anni che vanno dal 2007 (pre-evento) al 2022.

Utilizzando i valori *mediani spaziali*, relativi agli anni oggetto di analisi, si è proceduto a *normalizzare* tutti gli indici NDVI, andando a sottrarre in ambiente GIS (*Calcolatore Raster*), al corrispondente layer NDVI annuale di riferimento, il valore mediano spaziale di ogni anno. Questa procedura è stata eseguita per tutti gli anni (tab.6).

ANNO	MEDIANA NDVI (Spaziale)
2007 PRE	0.276
2007 POST	0.231
2008	0.264
2009	0.276
2010	0.248
2011	0.274
2013	0.288
2014	0.296
2015	0.287
2016	0.309
2017	0.276
2018	0.283
2019	0.274
2020	0.290
2021	0.276
2022	0.302

Tabella 6: Valori Mediani Spaziali dell'NDVI con anno di riferimento

Anche per i layer dei vari NBR calcolati è stata effettuata la normalizzazione, andando a sottrarre ai vari layer annuali dell'NBR il corrispettivo valore *mediano spaziale* ottenuto (tab.7).

ANNO	MEDIANA NBR (SPAZIALE)
PRE 2007	-0.137
POST 2007	0.135
2008	0.138
2009	0.148
2010	0.150
2011	0.150
2013	0.252
2014	0.261
2015	0.247
2016	0.270
2017	0.247

2018	0.239
2019	0.240
2020	0.256
2021	0.238
2022	0.257

Tabella 7: Valori Mediani Spaziali dell’NBR con anno di riferimento

Per comprendere gli effetti dell’incendio sulla vegetazione e i processi dinamici successivi all’evento si è provveduto a calcolare i $\Delta NDVI$ e i ΔNBR sui layer normalizzati.

Attraverso il *Calcolatore Raster*, è stata utilizzata la formula:

$$\Delta NDVI = PostNDVI - PreNDVI$$

È stato così calcolato il $\Delta NDVI$ dei diversi anni, utilizzando sempre come layer *preNDVI*, quello riferito al periodo del 2007, successivo all’evento.

Inoltre, è stata effettuata un’altra elaborazione del $\Delta NDVI$; andando a comparare l’NDVI del 2007, prima dell’evento e quello del 2022.

Per il ΔNBR è stata utilizzata, attraverso il *Calcolatore Raster*, la seguente formula:

$$\Delta NBR = PreFireNBR - PostFireNBR$$

Anche in questo caso il layer pre-evento dell’NBR utilizzato nei diversi calcoli è sempre il layer riferito al periodo del 2007, precedente all’evento.

3 RISULTATI E DISCUSSIONE

In questo capitolo verranno esposti i risultati delle elaborazioni effettuate in ambiente GIS relative al calcolo degli indici NDVI e NBR dell'area di studio, con lo scopo di verificare la correlazione tra i valori degli indici citati e le variazioni della copertura del suolo dovute ai processi di rigenerazione post incendio. I file raster ottenuti per i diversi anni considerati sono stati rappresentati con scale di colore adeguate, al fine di poter apprezzare al meglio le variazioni avvenute nell'arco temporale considerato (dal 2007 al 2022) e quindi poter effettuare alcune valutazioni riguardanti i processi dinamici in atto.

3.1 L'INDICE NDVI PER IL PERIODO COMPRESO TRA IL 2007 E IL 2022

Applicando la metodologia esposta nel paragrafo 2.4 – *Costituzione del dataset e procedure di elaborazione degli indici normalizzati in ambiente GIS*, è stata ottenuta la seguente sequenza di mappe tematiche. Le immagini di seguito riportate si riferiscono alle “*mappe di NDVI*” a partire dall'anno 2007, prima del passaggio del fuoco, fino al 2022. I dati telerilevati elaborati si riferiscono alla stagione estiva, con particolare riferimento ai mesi di luglio e agosto (fig.29a, 29b, 29c).

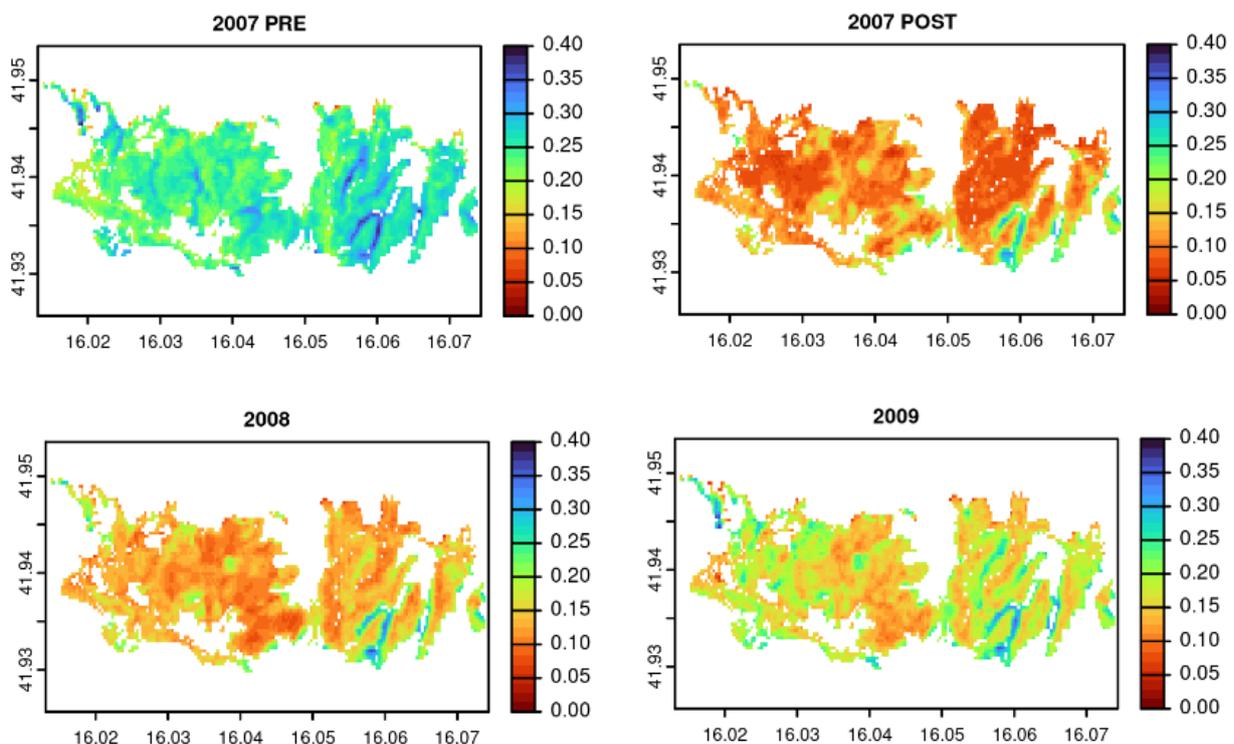


Figura 29a: Mappe NDVI relative agli anni 2007 - 2009

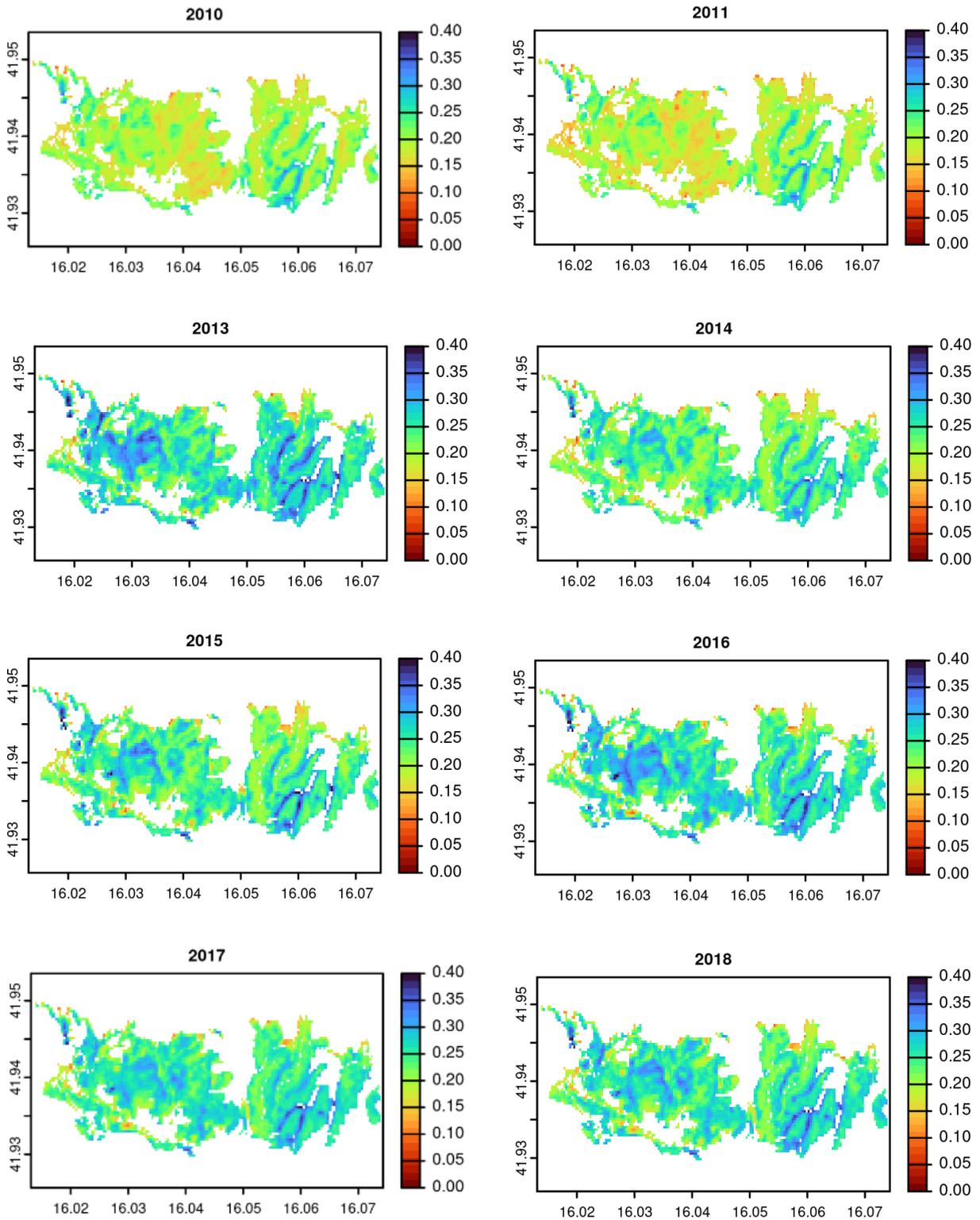


Figura 29b: Mappe NDVI relative agli anni 2010 - 2018

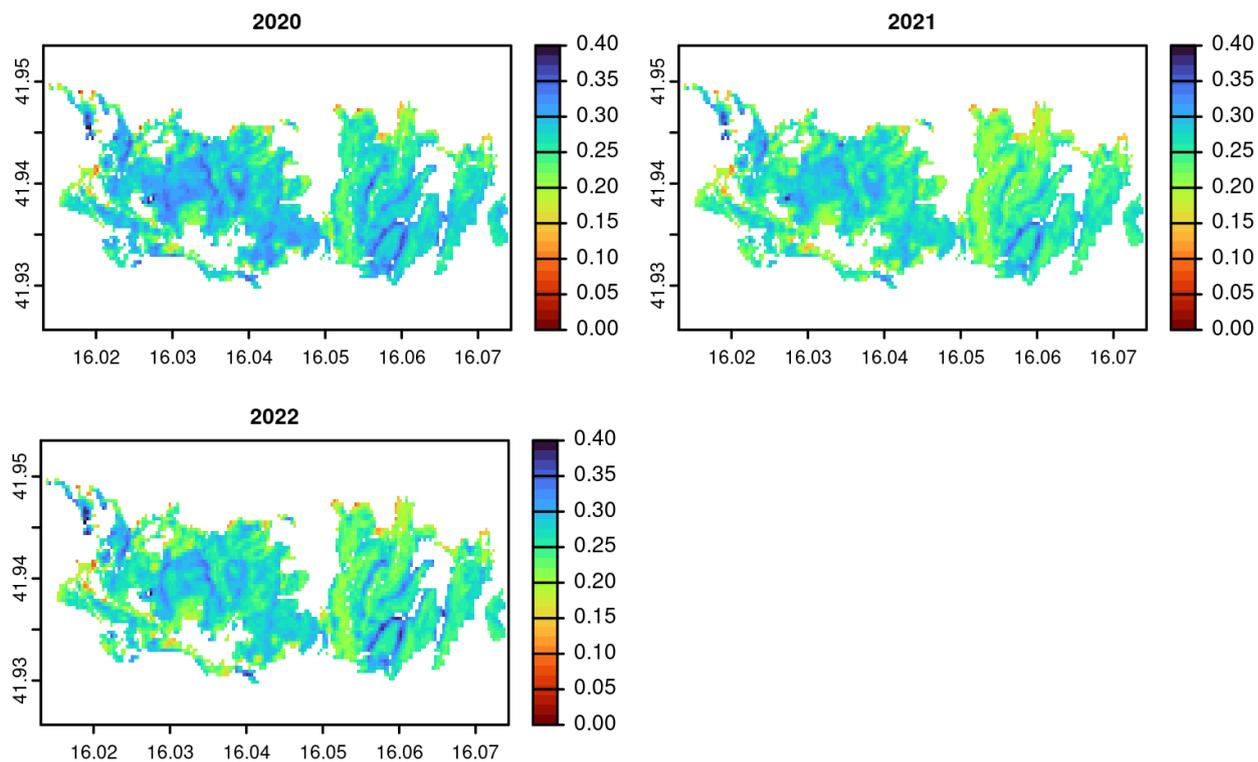


Figura 29c: Mappe NDVI relative agli anni 2020 - 2022

Per una migliore visualizzazione dei risultati i valori di NDVI sono stati normalizzati una seconda volta, in funzione della differenza rispetto al valore mediano di NDVI relativo all'immagine telerilevata pre evento.

Da un'analisi preliminare della mappa dell'indice NDVI rispettivamente riferita al periodo precedente al verificarsi dell'incendio (06/07/2007) e a quello subito successivo (29/07/2007) è possibile rilevare una sostanziale riduzione dei valori dell'indice sulla quasi totalità dell'area considerata, a dimostrazione dell'alta severità dell'incendio che ha interessato le pinete considerate (fig.30, 31).

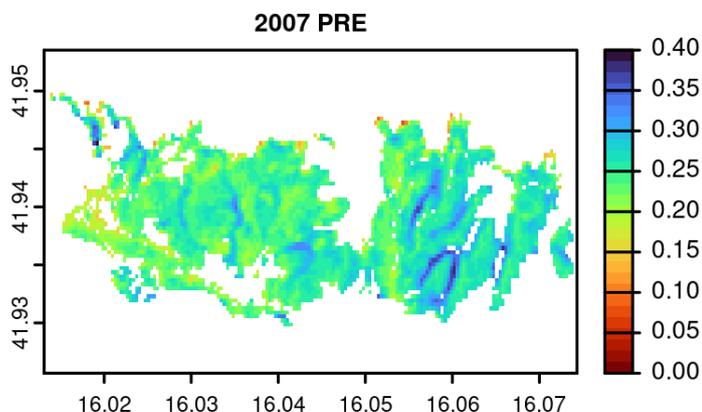


Figura 30: NDVI 2007 PRE

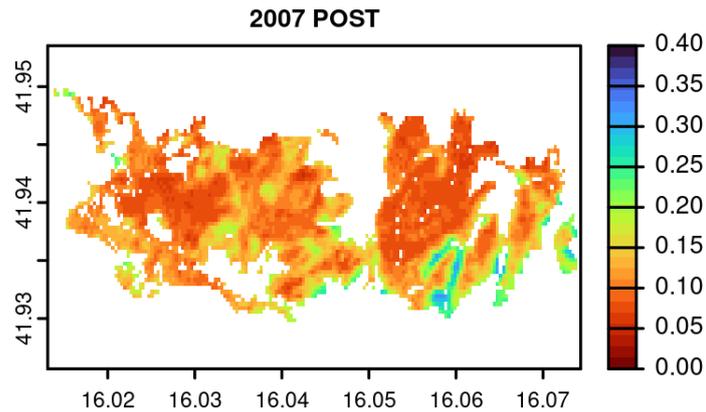


Figura 31: NDVI 2007 POST

L'evento considerato è stato all'epoca classificato come "incendio di chioma", i cui effetti hanno generalmente determinato danni irreversibili ai popolamenti arborei e a quelli arbustivi.

Il settore sud-orientale dell'area di studio, caratterizzato dalla presenza di evidenti incisioni, risulta essere quello meno colpito. Si tratta di una zona probabilmente caratterizzata dalla presenza di comunità forestali dominate nel popolamento arboreo, non solo dal Pino d'Aleppo, ma anche da altre sclerofille tipicamente mediterranee, quali Leccio e specie arbustive della macchia mediterranea. Le caratteristiche morfologiche della zona considerata hanno probabilmente influenzato l'avanzamento del fuoco in questo settore.

In premessa va detto che il contesto territoriale dell'area di studio è caratterizzato da un'accentuata eterogeneità dal punto di vista geomorfologico e vegetazionale; a questa fa riscontro, di conseguenza, un'eterogeneità nello sviluppo dei processi di rigenerazione e di risposta al passaggio del fuoco.

Analizzando le ulteriori mappe relative agli anni successivi è possibile osservare un graduale incremento dei valori dell'indice NDVI dovuto alla ripresa vegetativa post incendio. Esso però non risulta essere un fenomeno che si sviluppa in maniera uniforme sull'intera area considerata, in quanto è evidentemente collegato ad altri fattori che non riguardano solo la capacità rigenerativa della vegetazione, ma che si riferiscono anche ad aspetti geomorfologici ed edafici; un esempio caratteristico è quello dei numerosi versanti esposti a Sud-Est su cui sono evidenti processi erosivi probabilmente favoriti dal passaggio del fuoco. In questi contesti l'erosione degli strati superficiali del terreno ha determinato condizioni poco favorevoli allo sviluppo di processi dinamici di rigenerazione.

L'area di studio, infatti, risulta essere caratterizzata dall'alternanza di versanti, con diverse esposizioni, e di incisioni, più o meno profonde, in cui sono presenti diverse tipologie forestali,

con caratteristiche compositive e strutturali variabili, comunque nell'insieme riferibili a formazioni tipicamente mediterranee.

A dimostrazione dell'influenza degli aspetti geomorfologici sui processi dinamici della vegetazione attualmente in atto, si riportano due immagini satellitari rappresentative dello stato dei luoghi (fig.32, 33), rispettivamente riferite al 2006 e al 2023, riguardanti uno dei versanti esposti a Sud-Est presenti nell'area di studio; dalle immagini è possibile osservare che il grado di copertura forestale è evidentemente molto rado, a causa degli effetti dei processi erosivi già in atto prima del passaggio del fuoco.



Figura 32: ortofoto del 2006



Figura 33: immagine Google Satellite del 2023

Tali processi erosivi determinano delle variazioni morfologiche sui versanti con conseguente affioramento degli strati rocciosi superficiali; questa condizione solitamente non permette un regolare sviluppo della vegetazione, limitando i processi dinamici di rigenerazione post incendio, con conseguente presenza di numerose soluzioni di continuità nella vegetazione. Già nel 2006, infatti, alcune aree risultavano avere un popolamento più rado rispetto ad altre limitrofe; fenomeno che, in seguito all'incendio, si è ulteriormente accentuato (fig. 34, 35).



Figura 34: ortofoto del 2006



Figura 35: immagine di Google Satellite 2023

Nell'area sono presenti, inoltre, alcune zone in cui sono state recentemente effettuate attività riconducibili all'azione dell'uomo che hanno determinato disboscamento, riducendo così la copertura vegetativa, insediatasi dopo il passaggio del fuoco, e influenzando di conseguenza i valori dell'NDVI rilevati in fase di elaborazione delle immagini telerilevate (fig. 36, 37).



Figura 36: ortofoto del 2006



Figura 37: immagine Google Satellite del 2023

Un ulteriore elemento che caratterizza l'eterogeneità dei processi dinamici della vegetazione post incendio è direttamente correlato al tipo di vegetazione presente, con conseguente diversità in termini di capacità di adattamento, al passaggio del fuoco.

I fattori delineati stanno indubbiamente influenzando i processi dinamici in atto, con una conseguente distribuzione della vegetazione (rinnovazione post incendio) a macchia di leopardo. In alcune aree percorse dal fuoco, dopo l'evento, probabilmente c'è stata la colonizzazione da parte di specie tipicamente pirofite, come ad esempio il Cisto sp. Questa specie viene definita come specie pirofita attiva in quanto presenta un'alta germinabilità dei semi favorita dal calore sprigionato dal fuoco (Aguayo-Villalba et al., 2021). Si tratta quindi di un evidente processo dinamico direttamente correlato al passaggio del fuoco che consente, tra le altre cose, di interpretare l'eterogeneità dei valori dell'indice NDVI. Nella stagione estiva, infatti, la contenuta attività vegetativa dei cisti sp., influenza la risposta spettrale e quindi consente di spiegare i valori più bassi di NDVI riscontrati in alcune zone dell'area di studio (fig.38, 39).



Figura 38: ortofoto 2006



Figura 39: immagine di Google Satellite del 2023

È importante ricordare che l'elaborazione dei dati ha riguardato un periodo di tempo relativamente contenuto, di circa 15 anni; in quest'arco temporale la vegetazione di interesse forestale ha reagito al passaggio del fuoco con lo sviluppo di processi dinamici "insediativi" attualmente in fase di evoluzione e di assestamento.

Ulteriori indagini nei decenni successivi consentiranno di comprendere con maggiore chiarezza le modalità con cui la vegetazione forestale sta ricolonizzando le aree percorse dal fuoco, in relazione ai numerosi fattori di carattere fisico e biologico che contraddistinguono i versanti settentrionali del promontorio del Gargano.

Vengono riportati di seguito alcuni grafici riferiti ad alcuni punti interni all'area oggetto di studio, in cui è possibile esaminare l'andamento dell'indice NDVI dall'anno 2007, prima dell'evento, all'anno 2022. Nei grafici (fig.40) è riportato l'andamento dei valori dell'indice NDVI normalizzati, con i valori *mediani spaziali* dei Punti Sentinella, e i valori dell'indice NDVI non normalizzati.

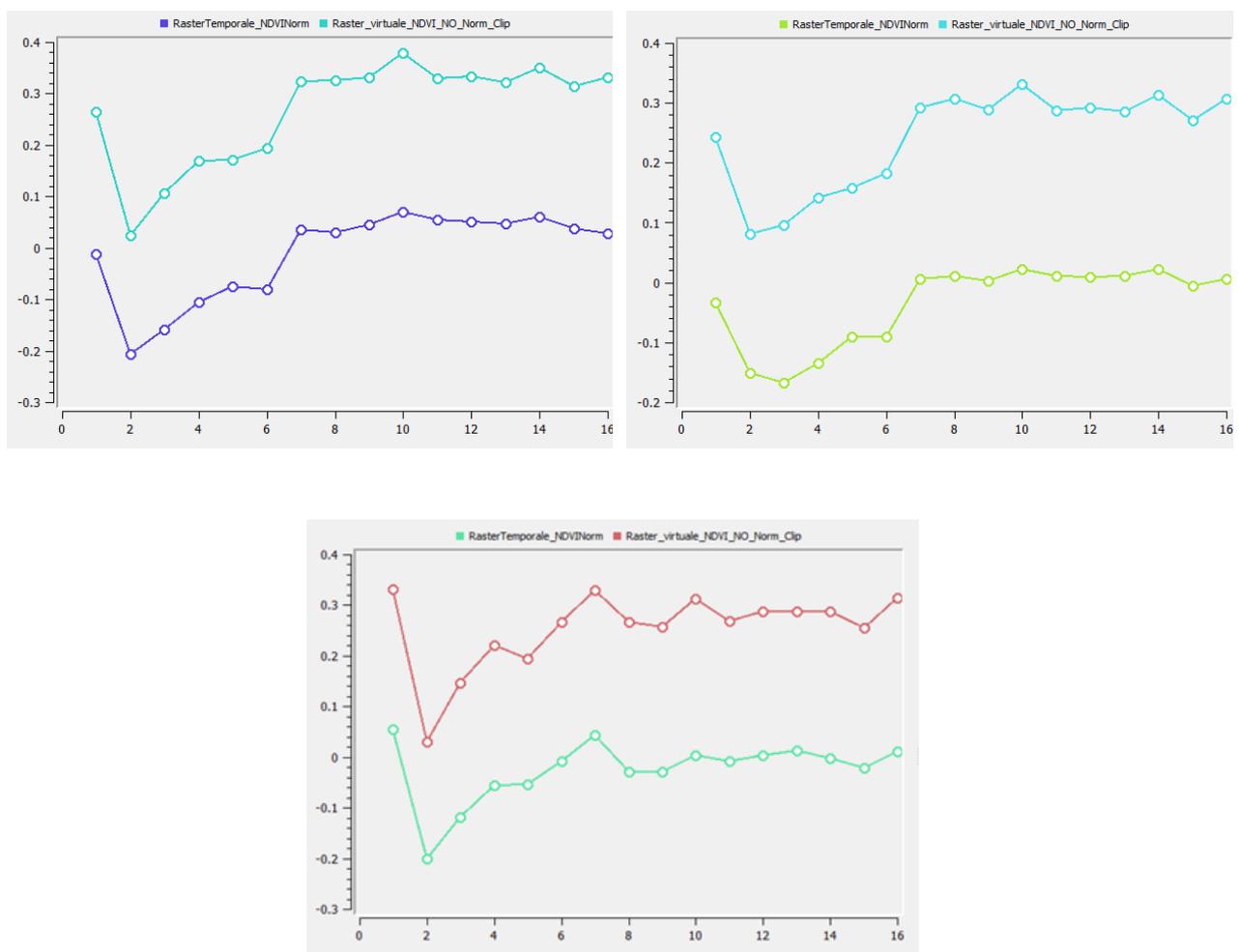


Figura 40: Andamento dell'indice NDVI normalizzato (spezzata inferiore) e non normalizzato (spezzata superiore) estrapolato da punti casuali all'interno dell'area interessata dal fuoco – Grafici QGIS

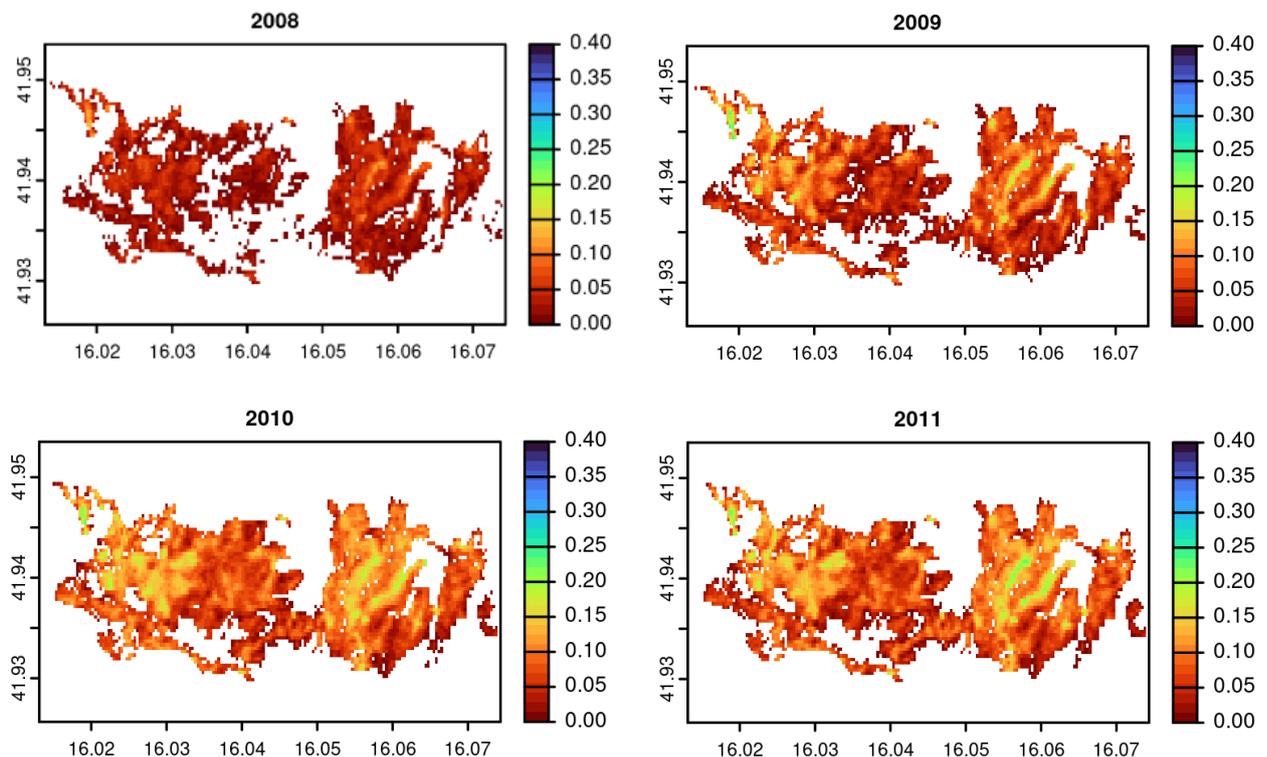
Dall'esame dei grafici è possibile osservare un graduale incremento dei valori di NDVI negli anni successivi al passaggio del fuoco.

Le variazioni dell'indice NDVI sono però probabilmente influenzate anche dalle condizioni climatiche stagionali, variabili negli anni considerati, con conseguente influenza sulle attività vegetative delle comunità forestali interessate e di conseguenza sulle risposte spettrali.

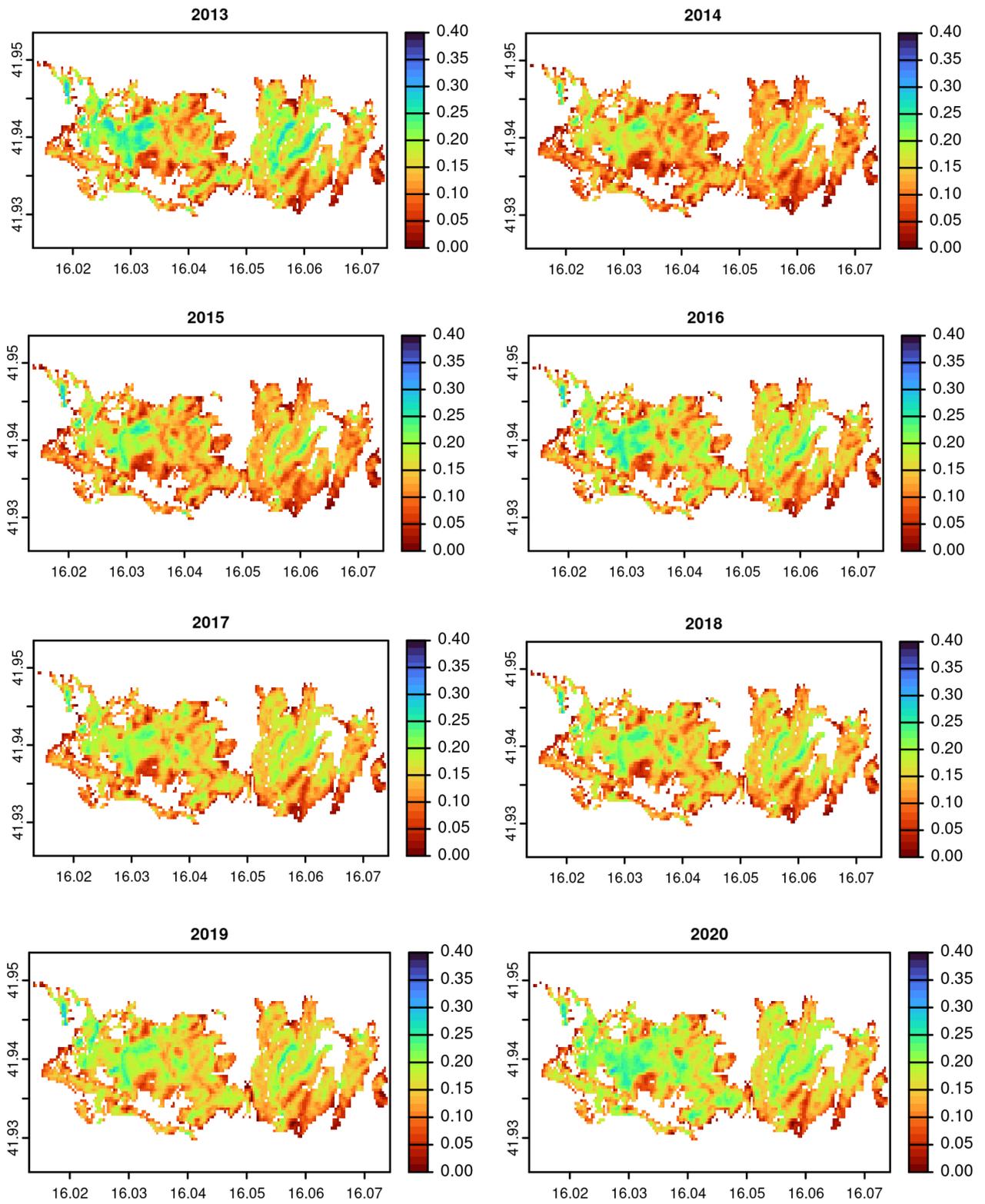
Tali condizioni climatiche variabili possono probabilmente consentire di spiegare alcuni picchi rilevati nelle curve rappresentate nei grafici, con particolare riferimento agli anni 2016 e 2020.

Una ulteriore considerazione si riferisce al picco riscontrato tra il 2011 e il 2013, probabilmente correlato alla mancanza di dati nel 2012 e al cambio del satellite di riferimento.

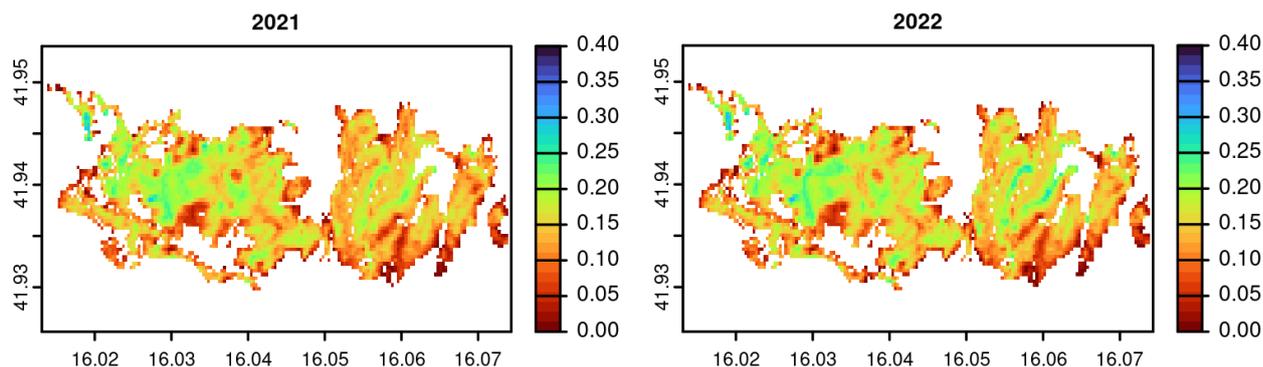
Per osservare come la vegetazione ha reagito all'evento e come questa successivamente abbia ricolonizzato le aree percorse dal fuoco nel corso degli anni è stata inoltre applicata la metodologia esposta nel paragrafo 2.4- *Costituzione del dataset e procedure di elaborazione degli indici normalizzati in ambiente GIS*, ottenendo le seguenti mappe del Δ NDVI (fig. 41a, 41b, 41c).



41a: Mappe Δ NDVI relative agli anni 2008 - 2011



41b: Mappe $\Delta NDVI$ relative agli anni 2013 – 2020



41c: Mappe Δ NDVI relative agli anni 2021- 2022

Nello specifico è stato calcolato il Δ NDVI, considerando come anno di riferimento il 2007 post incendio.

Dai grafici si osserva come si ha una maggiore ripresa vegetativa dopo i primi 5/6 anni dall'evento, con un ritorno dell'NDVI in alcune zone simile ai valori precedenti all'incendio. Tali valori simili sono riconducibili esclusivamente alla copertura del suolo determinata dalla rinnovazione di Pino d'Aleppo e non si riferiscono in alcun modo al ripristino delle originarie caratteristiche strutturali.

Tenendo conto dei risultati di altri studi condotti sui processi dinamici post incendio in pinete mediterranee pugliesi è stato possibile effettuare dei confronti e identificare delle similitudini con il caso di studio oggetto della presente tesi.

La ricerca considerata (Notarnicola, 2014), quale termine di confronto, ha riguardato una pineta localizzata nell'Arco Jonico Tarantino, nell'ambito della Riserva Naturale Biogenetica della "Stornara", percorsa dal fuoco su circa 29 ha nell'estate del 2012. La zona considerata è stata interessata dall'identificazione di 25 aree di saggio permanenti di forma quadrata con superficie pari a 1m x 1m.

Le osservazioni hanno evidenziato che l'insediamento del Pino d'Aleppo è avvenuto quasi esclusivamente durante il primo anno post incendio, oltre ad aver avuto una bassa densità di rinnovazione, riconducibile a una serie di cause, tra le quali vi sono l'elevata intensità lineare dell'incendio e le conseguenti elevate temperature, che non hanno permesso ai coni serotini di preservare i semi contenuti al loro interno, determinandone la morte. Altri fattori limitanti per la rinnovazione sono le particolari condizioni microclimatiche ed edafiche a cui sono soggette le pinete litoranee vegetanti su terreno sabbioso, oltre alla concorrenza con altre specie arbustive a sviluppo rapido, caratteristiche degli ambienti mediterranei.

Anche se presenti in contesti territoriali differenti, rispetto al caso di studio della presente tesi, le osservazioni e i risultati dello studio citato permettono di comprendere le dinamiche post incendio delle pinete di Pino d'Aleppo in ambiente mediterraneo.

Non è stato possibile, invece, consultare altri studi che si riferissero ad ambienti simili a quelli garganici con cui poter fare un confronto.

È stata effettuata un'ulteriore elaborazione in cui si è ricavato il Δ NDVI ottenuto dalla differenza tra l'NDVI del 2022 e l'NDVI del 2007 pre incendio (fig. 42).

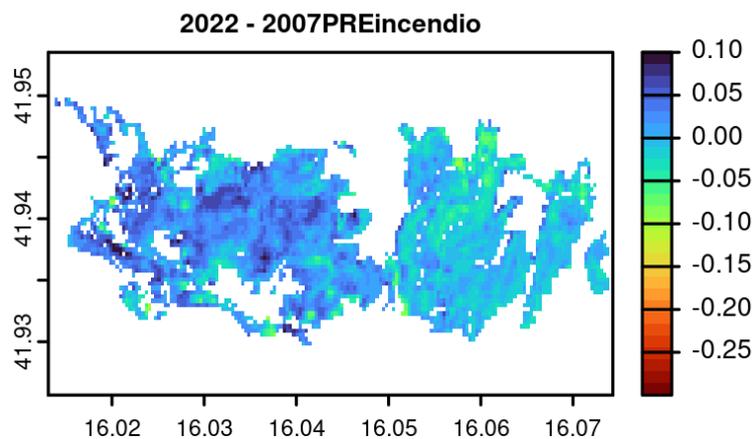


Figura 42: Δ NDVI (2007pre - 2022)

Tale elaborazione permette di osservare qual è stato l'incremento dei valori di NDVI dopo 15 anni dall'incendio, rispetto alla situazione iniziale del 2007, prima che si verificasse l'evento.

Nelle zone in cui si hanno valori di NDVI pari a 0 vuol dire che c'è stata una ripresa vegetativa che ha permesso di tornare ai valori precedenti l'incendio; in altre zone, invece, si riscontrano valori più alti di 0, questo vuol dire che vi è un maggior grado di copertura della vegetazione rispetto alla situazione antecedente all'evento. In limitate zone sono presenti valori al di sotto dello 0, di conseguenza è possibile affermare che solo in alcune aree localizzate non si sono verificati processi dinamici con conseguente diffusione della vegetazione di interesse forestale.

Si fa rilevare al riguardo che i valori di Δ NDVI riscontrati derivano esclusivamente dalla risposta spettrale della copertura forestale e che non consentono di effettuare alcun tipo di valutazione sulle attuali caratteristiche strutturali dei popolamenti, necessariamente derivanti da rilievi diretti sul campo.

3.2 L'INDICE NBR PER IL PERIODO COMPRESO TRA IL 2007 E IL 2022

Un altro indice utilizzato per poter comprendere quanto l'incendio ha inciso sull'ecosistema e sulla vegetazione presente è l'NBR.

Applicando la metodologia descritta nel paragrafo 2.4- *Costituzione del dataset e procedure di elaborazione degli indici normalizzati in ambiente GIS*, sono state ottenute le seguenti mappe tematiche di Δ NBR (fig. 43, 44).

La figura n.43 è stata ottenuta considerando i valori di NBR riferiti all'anno 2007 pre e post incendio; mentre la figura n.44, tenendo conto dei valori degli anni 2007 pre evento e 2008.

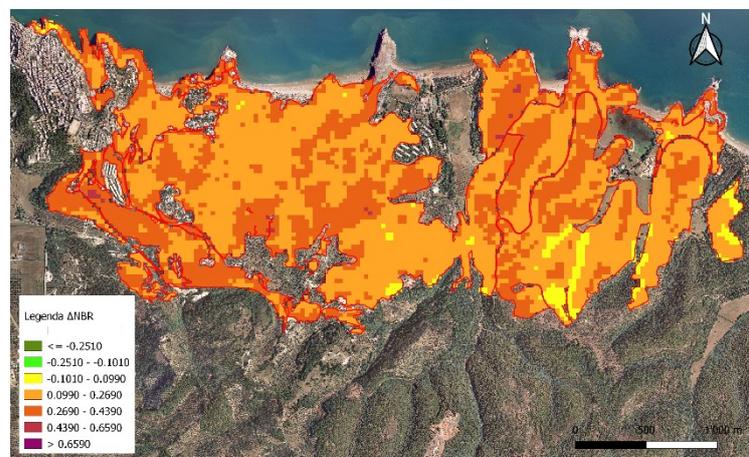


Figura 43: Δ NBR (2007post)

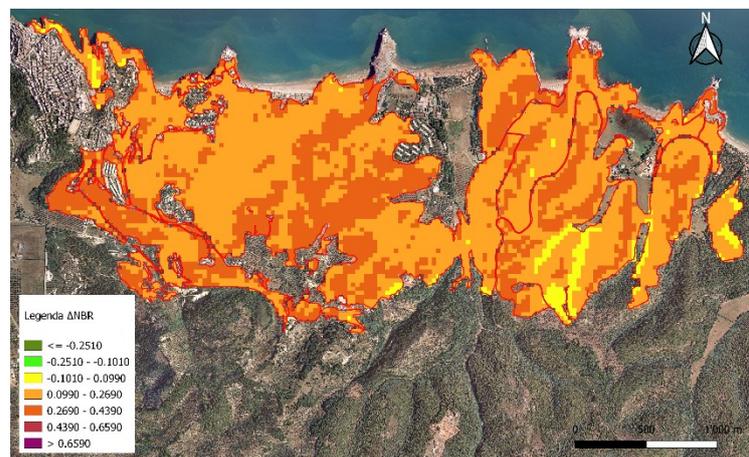


Figura 44: Δ NBR (2008)

Dalle mappe ottenute è possibile notare come la vegetazione sia stata percorsa in modo significativo dal fuoco durante l'evento, che ha interessato l'area di studio con un elevato grado di severità.

È possibile evidenziare inoltre che alcune incisioni localizzate nel settore meridionale dell'area di studio, prevalentemente caratterizzate dalla presenza di vegetazione forestale costituita da

latifoglie mediterranee, sono state poco o non affatto percorse dal fuoco, come è stato già possibile evidenziare nelle mappe considerando il ΔNDVI .

Nelle restanti zone i valori di ΔNBR sono sempre superiori al range 0.270 - 0.439 fino a quello 0.440 - 0.659, a dimostrazione della gravità del fuoco variabile fra moderata a elevata.

3.3 DISCUSSIONE

A conclusione dell'esposizione dei risultati ottenuti con l'elaborazione delle immagini satellitari considerate è possibile affermare che il telerilevamento, con i relativi indici utilizzati, costituisce un valido supporto per l'interpretazione dei processi dinamici post incendio in ambiente mediterraneo.

Le valutazioni e le osservazioni effettuate evidenziano però la necessità di una preliminare conoscenza delle principali caratteristiche morfologiche dei luoghi interessati al fine di ottimizzare al meglio l'interpretazione dei risultati dell'elaborazioni delle immagini telerilevate, in relazione ai processi dinamici in atto.

Una ulteriore valutazione si riferisce all'accentuata eterogeneità dei processi dinamici che interessano le comunità forestali percorse dal fuoco in ambiente mediterraneo, anche in relazione agli attuali cambiamenti climatici. Ciò evidenzia la necessità di combinare il telerilevamento con i rilievi in campo, al fine di ottenere risultati applicabili anche in ambito gestionale.

I risultati e le elaborazioni condotte hanno consentito di evidenziare che dopo 5/6 anni la copertura del suolo dell'area percorsa dal fuoco si è parzialmente ristabilita. Sulla base di quanto detto in precedenza, sarebbe auspicabile prevedere ulteriori indagini in campo volte a identificare le principali caratteristiche compositive e strutturali dei giovani popolamenti forestali insediatisi, al fine di combinare gli strati informativi per una conoscenza più completa dei processi dinamici post incendio. Tali osservazioni in campo potrebbero, inoltre, consentire di verificare la presenza di aree interessate da processi erosivi, a conferma dell'incidenza del fuoco non solo sulle caratteristiche biologiche dell'ambiente interessato, ma anche su quelle fisiche e morfologiche.

Un'ulteriore considerazione viene fatta sulle potenzialità dei portali e dei siti dedicati alla distribuzione delle immagini telerilevate, oramai sempre più efficienti e performanti, che costituiscono un valido supporto per l'analisi dell'evoluzione dei processi dinamici nei contesti forestali percorsi dal fuoco.

4 CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi ha avuto lo scopo analizzare i processi dinamici post incendio nell'ambito di una pineta di Pino d'Aleppo percorsa dal fuoco nel 2007, localizzata nella fascia costiera e basso-collinare del Gargano.

I processi dinamici analizzati si riferiscono a un arco temporale di 15 anni e sono stati esaminati utilizzando immagini telerilevate ed elaborando gli indici della vegetazione NDVI e NBR.

L'incendio ha interessato una superficie di circa 550 ha, compresa nel territorio del Parco Nazionale del Gargano e in parte nella ZSC di Manacore del Gargano.

I risultati dello studio condotto hanno consentito di verificare l'efficacia dell'utilizzo delle immagini telerilevate e degli indici di vegetazione, per comprendere i processi dinamici post incendio, sia dal punto di vista delle aree interessate dalla rinnovazione che dei tempi necessari per la ripresa vegetativa dopo il passaggio del fuoco.

Le elaborazioni effettuate hanno consentito di verificare che, in un arco temporale di 15 anni, le pinete mediterranee di Pino d'Aleppo, presenti nel contesto garganico, hanno la capacità di rigenerarsi in maniera consistente, nonostante siano state percorse da incendi caratterizzati da un elevato grado di severità, con conseguenti sostanziali alterazioni delle caratteristiche compositive e strutturali dei popolamenti interessati.

I risultati ottenuti costituiscono un valido elemento di supporto per la pianificazione degli interventi di restauro vegetazionale, necessari per favorire il ripristino degli equilibri ecologici degli ecosistemi forestali interessati.

Le elaborazioni effettuate, con particolare riferimento al Δ NDVI, possono inoltre costituire la base conoscitiva per eventuali ulteriori studi, integrati con rilievi in campo e osservazioni dirette riguardanti gli aspetti compositivi e strutturali dei giovani popolamenti forestali insediatisi dopo il passaggio del fuoco.

L'approccio utilizzato nella presente tesi si basa sull'elaborazioni di immagini telerilevate, disponibili su portali dedicati e scaricabili gratuitamente; tali immagini sono oltretutto compatibili con gli attuali sistemi GIS open source e non richiedono particolari software o sistemi specifici per la loro elaborazione.

Pur utilizzando immagini multispettrali con risoluzione spaziale di 30 m, i risultati ottenuti risultano adeguati per l'interpretazione dei fenomeni di rinnovazione della vegetazione post incendio, evidenziando la grande capacità di risposta delle comunità forestali in ambiente mediterraneo.

Tutto ciò consente di confermare l'efficacia del telerilevamento per lo studio dei processi

dinamici che riguardano gli ecosistemi forestali; in particolare l'utilizzo di immagini telerilevate e il calcolo di specifici indici vegetazione costituisce un valido supporto per i processi decisionali e gestionali.

Il presente lavoro di tesi ha avuto, inoltre, l'obiettivo di evidenziare come gli attuali portali disponibili siano particolarmente efficaci ed efficienti per il download di immagini telerilevate multispettrali, da utilizzare in ambiente GIS.

Tale approccio, oltre a consentire di determinare in termini quantitativi (incremento dell'NDVI) i processi dinamici in atto, consente anche di effettuare alcune osservazioni e valutazioni riguardanti la distribuzione territoriale dei processi di rinnovazione, tenendo conto anche dei principali aspetti geo-morfologici.

La tematica del telerilevamento e dei processi dinamici della vegetazione è stata ampiamente studiata in ambito tecnico scientifico, ma prevede interessanti margini di miglioramento, soprattutto in relazione alle costanti innovazioni riguardanti l'osservazione della Terra e ai relativi sistemi di elaborazione dei dati.

La procedura di elaborazione sviluppata nell'ambito della tesi può essere applicata anche in altri contesti territoriali per lo studio dei processi dinamici riguardanti tipologie forestali differenti da quelle tipicamente mediterranee, contribuendo così a incrementare le conoscenze sul dinamismo della vegetazione e sulla capacità di risposta ai fattori e agli eventi di disturbo.

BIBLIOGRAFIA

- Aguayo-Villalba A. Á., Álvarez-Gómez C. M., Aisa-Ahmed M., Barroso-Rodríguez L. M., Camacho-López S., Cocero-Ramírez A., & Sánchez-Romero C. (2021). *Effect of fire on viability and germination behaviour of Cistus ladanifer and Cistus salvifolius seeds*. *Folia Geobotanica*, 56(4), 215-225.
- Connell J. H. (1978). *Diversity in tropical rain forests and coral reefs: high diversity of trees and corals is maintained only in a non-equilibrium state*. *Science* 199, 1302–1310. (immagine 3)
- Foster D., Knight D. & Franklin, J. (1998). *Landscape Patterns and Legacies Resulting from Large, Infrequent Forest Disturbances*. *Ecosystems* 1, 497–510. (immagine 2)
- Oliver C. D. and Larson B. A. "Forest Stand Dynamics, Update Edition" (1996). *Yale School of the Environment Other Publications*. 1. (immagine 1)
- Blasi C., Bovio G., Corona P., Marchetti M., (a cura di); 2004 - *INCENDI E COMPLESSITA' ECOSISTEMICA: Dalla pianificazione forestale al recupero ambientale*. Roma: Palomi & Partner.
- Danielli N. ; 2011 - *L'osservazione della Terra - Telerilevamento: Manuale tecnico-pratico per l'elaborazione delle immagini digitali*. Palermo: Tipografia Priulla.
- Noti V.; 2021 - *GIS Open Source per geologia e ambiente: Analisi e gestione di dati territoriali e ambientali con QGIS*. II EDIZIONE. Palermo: Dario Flaccomio Editore.
- Bovio G., Corona P., Leone V.; 2014 - *Gestione selvicolturale dei combustibili forestali per la prevenzione degli incendi boschivi*. Arezzo: Compagnia delle Foreste.
- Blasi C.; 2010 - *La vegetazione d'Italia*. Roma. Palombi & Partner.

Notarnicola G.; 2014 - *Analisi della Rinnovazione naturale post-incendio in una pineta litoranea. Un caso di studio nella Riserva Naturale "Stornara"*; Proceeding of the Second International Congress of Silviculture. Florence.

Mercurio R.; 2016 – *Otto lezioni sul restauro forestale*; Youcanprint.

Gomasca M. A.; 2004 - *La rappresentazione del territorio è Geomatica!*; Bollettino A. I. C., nr. 143/2011.

Pedrotti F.; 1995 - *La vegetazione forestale italiana*; Accademia nazionale dei Lincei.

White P. S. e Pickett S. T. A.; 1985. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Academic Press, New York.

SITOGRAFIA

1. Index DataBase:
<https://www.indexdatabase.de/>
2. Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare:
<https://www.mase.gov.it/pagina/mattm>
3. USGS – Earth Explorer:
<https://earthexplorer.usgs.gov/>
4. USGS:
<https://www.usgs.gov/>
5. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation:
https://semiautomaticclassificationmanual.v5.readthedocs.io/it/latest/remote_sensing.html
6. SIT Puglia:
<http://www.sit.puglia.it/>
7. Esa:
<https://www.esa.int/>
8. Browser EO:
<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=10&lat=41.9&lng=12.5&themeId=DEFAULT-THEME&toTime=2023-07-21T11%3A22%3A39.094Z>
9. United Nations:
<https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>
10. Fig.15 - Risposta spettrale della vegetazione in base al suo stato di salute :
<https://www.regrow.ag/post/how-to-track-crop-growth-using-msavi-ndvi-and-ndre>
11. Figura 17 - Regione spettrale del RED EDGE:
<https://agrio.app/Red-Edge-reflectance-monitoring-for-early-plant-stress-detection/>
12. Figura18 - Confronto della risposta spettrale di vegetazione sana e aree bruciate e
Tabella 4 - livelli di gravità del Δ NBR:
<https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>

Ringraziamenti

Si ringrazia in particolare il Prof. Pirotti per avermi guidato nelle fasi di stesura della presente tesi, il Ten. Col. Notarnicola, comandante del Reparto Carabinieri Biodiversità di Martina Franca, per la sua grande disponibilità, e il Dr. Pirone, Funzionario Responsabile del Centro Operativo Regionale della sezione di Protezione Civile, per avermi fornito i dati relativi agli incendi boschivi che hanno interessato il territorio dell'area di studio.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, a Roberto, Margherita e Andrea, punti cardine nella mia vita, grazie al quale oggi sono riuscita a raggiungere questo traguardo.