DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI, DEI SUOLI E DEL PAESAGGIO

NUOVE TECNICHE GEOMATICHE A SUPPORTO DEL MONITORAGGIO POST - INCENDIO: IL CASO DELLA FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE

New geomatic techniques to support post-fire monitoring: the case of the Public Forest of Cesane (Marche region)

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
ELEONORA BRUTTI

Relatore:
PROF. CARLO URBINATI

Correlatori:
DOTT. ROBERTO PIERDICCA
DOTT. ALESSANDRO VITALI

ANNO ACCADEMICO 2018-2019

.

A mia nonna
che non è riuscita ad essere presente fisicamente
ma che da lassù mi ha dato il coraggio di non mollare.
Ti dedico i miei sorrisi, la mia vittoria e le mie lacrime
Perché Tu sarai ovunque io guardo.
Manchi.

PAROLE CHIAVE

INCENDI BOSCHIVI

DISTURBI

TELERILEVAMENTO

LiDAR

INDICI DI VEGETAZIONE

SEVERITA’

FOTOGRAMMETRIA

SOMMARIO

PAROLE CHIAVE 3

SOMMARIO 4

ELENCO DELLE TABELLE 6

ELENCO DELLE FIGURE 7

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI 11

INTRODUZIONE 12

CAPITOLO 1 **IL FUOCO COME FATTORE ECOLOGICO: CONTESTUALIZZAZIONE E MONITORAGGIO POST-DISTURBO** 14

1.1 Il fuoco come fattore di disturbo nelle foreste 14

1.2 Gli incendi in Italia nel 2017 16

1.2.1 Telerilevamento:immagini multispettrali satellitari 21

1.2.2 Fotogrammetria 27

1.2.3 Laser Scanner 32

1.3 Obiettivi della Tesi 38

CAPITOLO 2 **MATERIALI E METODI** 40

2.1 La foresta demaniale delle Cesane 40

2.1.1 Inquadramento geografico e geomorfologico 40

2.1.2 Uso del suolo 41

2.1.3 Caratteri climatici 41

2.2 L'incendio forestale delle Cesane e sopralluoghi nell'area interessata 43

2.3 Analisi della severità con immagini Sentinel-2 45

2.3.1 Tipologia e scelta delle immagini satellitari 45

2.3.2 Calcolo dell'indice Normalized Burn Ratio con dati Sentinel-2 47

2.3.3 Calcolo dell'indice Delta Normalized Burn Ratio (dNBR) 50

2.3.4 Perimetrazione incendio boschivo 52

2.3.5 Classificazione della severità dell'incendio 53

2.4 Analisi del recupero vegetazionale post – incendio 54

2.4.1 Indici di vegetazione 54
2.4.2 Costruzione delle curve degli indici spettrali di vegetazione (Spectral Vegetation Indices - SVI) 58
2.5 Rilievo fotogrammetrico post-incendio con APR per ricostruzione DTM 58
2.5.1 Elaborazione dati 59
2.6 Rilievo prossimale post-disturbo con tecnologia SLAM per la stima dendrometrica del soprassuolo interessato 63
2.6.1 Rilievo in campo con strumentazione Kaarta Stencil 2 e volo APR 63
2.6.2 Elaborazione dati da tecnologia SLAM e APR 66
CAPITOLO 3 **RISULTATI** 75
3.1 Severità e recupero vegetazionale con dati satellitari 75
3.1.1 Dinamismi post-incendio con indici di vegetazione 80
3.2 Costruzione di un modello DTM da rilievo fotogrammetrico 85
3.3 Utilizzo della tecnologia SLAM per il rilievo dendrometrico del soprassuolo percorso da incendio 87
DISCUSSIONE 92
CONCLUSIONI 99
BIBLIOGRAFIA 101
ALLEGATO 1 106

ELENCO DELLE TABELLE

TABELLA 1: CLASSIFICAZIONE DELLA FOTOGRAMMETRIA 29
TABELLA 2: BANDE SPETTRALI SENTINEL-2 (ELABORAZIONE DATI FONTE: HTTP://WWW.GISAGMAPS.COM/LANDSAT-8-SENTINEL-2-BANDS/) 46
TABELLA 3: TIPOLOGIA DI PRODOTTI SENTINEL-2 (ELABORAZIONE DATI FONTE:ESA) 46
TABELLA 4: IMMAGINI SENTINEL-2 UTILIZZATE PER IL RILIEVO DELL'AREA INCENDIATA 47
TABELLA 5: CATEGORIE FORESTALI PER LA CALIBRAZIONE DEL DNBR 51
TABELLA 6: ELENCO DELLE IMMAGINI UTILIZZATE PER L'ANALISI DELLE DINAMICHE DI RINNOVAZIONE POST-INCENDIO 54
TABELLA 7: DNBR MEDIO PER CATEGORIA FORESTALE 79
TABELLA 8: DATI TABELLARI 90

ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 1: RIPARTIZIONE DELLA SUPERFICIE NAZIONALE PER MACROCATEGORIE INVENTARIALI (FONTE: ELABORAZIONE DATI INFC 2017) 16
FIGURA 2: SUPERFICIE BOSCHIVA (IN MIGLIAIA DI HA) PERCORSA DAL FUOCO PER REGIONE. PERIODO GENNAIO 2009 - MAGGIO 2016. (FONTE: OPENDATASICILIA) 17
FIGURA 3: NUMERO DI INCENDI ED AREA BRUCIATA PER REGIONE NEL 2017 (FONTE: EFFIS 2018) 17
FIGURA 4: STAGIONALITÀ DEGLI INCENDI (1990 - 2008). IN ASCISSA SONO RAPPRESENTATI I MESI DELL'ANNO E IN ORDINATA IL NUMERO MEDIO MENSILE DI INCENDI (FONTE: MICHETTI ET AL. 2013). 18
FIGURA 5: NUMERO DI INCENDI IN ITALIA DISTINTO PER SUPERFICIE BOSCATA E NON BOSCATA PER IL PERIODO 1961 – 2010 (FONTE: LOVREGLIO ET.AL – FOREST@ 9: 137-147). 18
FIGURA 6:NUMERO DI INCENDI (ASSE ORDINATA A DESTRA) E SUPERFICI (HA) BOSCATA E NON BOSCATA (ASSE ORDINATA A SINISTRA) PERCORSE DAL FUOCO - ANNI 2011 - 2017 (FONTE: ANNUARIO STATISTICO 2018: 39) 19
FIGURA 7:TEMPERATURE MEDIE E PRECIPITAZIONI CUMULATE MENSILI PER GLI ANNI 2006-2007 / 2016-2017 IN RELAZIONE ALLE MEDIE DEL PERIODO 1952-2015 PER LA STAZIONE DI URBINO.(FONTE BRUTTI, 2017). 20
FIGURA 8: SPETTRO ELETTROMAGNETICO (WIKIPEDIA.PNG, 2012). 22
FIGURA 9: ESEMPI DI FIRME SPETTRALI DI DIVERSE SUPERFICI (CGT, S.D.). 22
FIGURA 10: FIRMA SPETTRALE DELLA VEGETAZIONE. I PIGMENTI FOGLIARI E LA COMPOSIZIONE INFLUENZANO LA RISPOSTA NEL VISIBILE (0.4-0.7 μM); LA STRUTTURA INTERNA DELLE FOGLIE E LA DISPOSIZIONE DELLE CELLULE NELL'INFRAROSSO VICINO (0.75-1.3μM); IL CONTENUTO D'ACQUA NELL'INFRAROSSO A ONDE CORTE (1.3-2.5 μM) 24
FIGURA 11: COMPONENTI DI UN SISTEMA DI TELERILEVAMENTO (ALTOBELLI, 2018) 25
FIGURA 12:IMMAGINE MULTISPETTRALE CON LE TRE BANDE RELATIVE ALLA PORZIONE DI SPETTRO DEL VISIBILE (ROSSO, VERDE E BLU) E LE CORRISPONDENTI TRE MATRICI DI VALORI NUMERICI (PACIELLO, 2015). 26
FIGURA 13: VISIONE DI UN OGGETTO DA DIVERSI CENTRI DI PRESA (FONTE: PRINCIPI E STRUMENTI DELLA FOTOGRAMMETRIA:6) 28
FIGURA 14: RELAZIONE FRA COORDINATE IMMAGINE (X,Y) E COORDINATE 3D OGGETTO (X,Y, Z) 30
FIGURA 15:RILIEVO FOTOGRAMMETRICO. FASE DI RESTITUZIONE 31
FIGURA 16: ESEMPIO DI RILIEVO ARCHITETTONICO CON LASER SCANNER DA DRONE (PISA) (MICROGEO) 32
FIGURA 17: LASER SCANNER DISTANZIOMETRI 34
FIGURA 18: LASER SCANNER TRIANGOLAZIONE 34

FIGURA 19:NUVOLA DI PUNTI RILEVATA CON LIDAR TERRESTE IN UN POPOLAMENTO FORESTALE 34
FIGURA 20: FUNZIONAMENTO FASCIO DI LUCE LIDAR (RESEARCHGATE, S.D.) 35
FIGURA 21: NUMERO DI RITORNI LIDAR. ALS.....36
FIGURA 22: TERRESTRIAL LASER SCANNER (TLS) FIGURA 23: AIRBORNE LASER SCANNER (ALS) 36
FIGURA 24: SISTEMA DI *PROXIMAL SENSING* CON TECNOLOGIA SLAM 37
FIGURA 25:ITALIA (FONTE GOOGLE EARTH) A SINISTRA; FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE (FONTE: ELABORAZIONE IMMAGINI SENTINEL-2 DEL 8-10-2019) A DESTRA. 40
FIGURA 26: DISTRIBUZIONE VEGETAZIONE FORESTALE (ELABORAZIONE DATI PROVINCIA DI PESARO URBINO) 41
FIGURA 27: ANDAMENTO DELLE TEMPERATURE MEDIE 2016-2017 PER LA STAZIONE DELLE CESANE. (OSSMETEO S.D.). 42
FIGURA 28:ANDAMENTO DELLE PRECIPITAZIONI CUMULATE 2016 - 2017 PER LA STAZIONE DELLE CESANE. (OSSMETEO S.D.). 43
FIGURA 29: AREA PERCORSA DAL FUOCO. A) IL REPENTINO RICACCIO VEGETATIVO DI ORNIELLO (*FRAXINUS ORNUS*), DUE MESI DOPO L'INCENDIO; B) 9 MESI DOPO L'INCENDIO, INIZIO DELLO SVILUPPO DELLA VEGETAZIONE ERBACEA; C) DOPO DUE ANNI ESATTI DALL'INCENDIO SI OSSERVA LO SVILUPPO DELLA VEGETAZIONE ERBACEA E DEI POLLONI DI ORNIELLO NONCHÈ TUTTI I FUSTI DI PINO NERO CARBONIZZATI. 44
FIGURA 30: PERIMETRO DELL'INCENDIO BOSCHIVO ESEGUITO DAI CARABINIERI FORESTALI RIPORTATO SU IMMAGINE RGB DA SENTINEL-2 (DATA 16-10-2019). 45
FIGURA 31: CONFRONTO DELLA RISPOSTA SPETTRALE DELLA VEGETAZIONE A DIVERSE LUNGHEZZE D'ONDA TRA UN'AREA CON COPERTURA VEGETALE FOTOSINTETIZZANTE E UN'AREA COLPITA DA INCENDIO. 49
FIGURA 32: EFFETTO DELLA COPERTURA FORESTALE PRIMA DELL'INCENDIO SULL'INDICE DI SEVERITÀ DNBR. IL VALORE DI NBR PARI AD 800 CORRISPONDE AD UNA ELEVATA COPERTURA DELLE CHIOME, MENTRE UN VALORE DI 25 È INDICATIVO DI SCARSA O ASSENTE COPERTURA VEGETALE (FONTE: MILLER & THODE 2007). 51
FIGURA 33: WORKFLOW UTILIZZATO PER LA PRODUZIONE DELLA CARTA DI SEVERITÀ DI INCENDIO ATTRAVERSO IL CALCOLO DELL'INDICE DNBR 52
FIGURA 34: POLIGONI RISULTATI DALLA SEGMENTATAZIONE CON SOFTWARE ECOGNITION; IN EVIDENZA L'AREA D'INCENDIO CLASSIFICATA MANUALMENTE (FONTE:ELABORAZIONE DATI QGIS).....53
FIGURA 35: CLASSI DI SEVERITÀ SENSU KEY AND BENSON, 2005 53
FIGURA 36: VARIAZIONE DI NDVI DURANTE LA GROWING SEASON (SOPRA); RISPOSTA SPETTRALE DELLA VEGETAZIONE IN BASE ALLO STATO DI SALUTE (SOTTO) (AGRICOLUS, S.D.).....56
FIGURA 37: VARIAZIONE RISPOSTA SPETTRALE IN CASO DI STRESS IDRICO CON UN INNALZAMENTO GENERALE DEI VALORI DI RADIAZIONE RIFLESSA (INSTITUTE FOR REMOTE SENSING OF ENVIRONMENTE, S.D.).....57
FIGURA 38: RILIEVO FOTOGRAMMETRICO E POSIZIONE DEI MARKER AL SUOLO DEL-14-04-2018 SULL'AREA INCENDIATA DELLA FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE 59

FIGURA 39: WORKFLOW DELLE PROCEDURE SEGUITE PER L'ELABORAZIONE DEI DATI RILEVATI DA DRONE NELL'AREA DELLE CESANE. 60
FIGURA 40: NUVOLA DI PUNTI SPARSA DELL'AREA DI STUDIO VISUALIZZATA CON 3DF ZEPHYR. 61
FIGURA 41: GCP SU NUVOLA DENSA (A SINISTRA); TARGET SPECIFICO DSC00453 (A DESTRA) 61
FIGURA 42:MESH DELL'AREA DI STUDIO REALIZZATA CON 3D ZEPHYR. 62
FIGURA 43: STRUMENTO KAARTA STENCIL 2 (A SINISTRA); MONITOR DI VISUALIZZAZIONE CON PARAMETRI DI DEFAULT (A DESTRA) 64
FIGURA 44: PUNTI DI CONTROLLO PER RILIEVO CON APR PER LA GEOREFERENZIAZIONE DELLA NUVOLA ESTRATTA CON STENCIL (FONTE:ELABORAZIONE DATI QGIS 3.4) 64
FIGURA 45: A) RTK. BASE (A DESTRA); ROVER CON TARGET (A SINISTRA); B) DRONE DJI SPARK 65
FIGURA 46: DETTAGLIO DELLA NUVOLA DI PUNTI ORIGINARIA CON PERDITA DI ORIENTAMENTO CON AGISOFT PHOTOSCAN 67
FIGURA 47: IMMAGINE OFF GROUND POINT DELL'AREA CAMPIONE OTTENUTA CON CLOUD COMPARE 68
FIGURA 48: NUVOLA DI PUNTI ELABORATA CON CLOUD COMPARE RILIEVO SLAM: IN BLU LA SEZIONE 1.25-1.35 M DI ALTEZZA UTILE PER ESTRARRE IL DATO DIAMETRICO PER OGNI FUSTO. 69
FIGURA 49: NUVOLA DI PUNTI SPARSA ESTRATTA DA RILIEVO CON DJI SPARK (FONTE: NOSTRA ELABORAZIONE CON DATI AGISOFT PHOTOSCAN) 70
FIGURA 50: NUVOLA DI PUNTI DENSA CON MARKER (FONTE: ELABORAZIONE DATI AGISOFT PHOTOSCAN) 71
FIGURA 51: CLASSIFICAZIONE DELLA NUVOLA DENSA PER RICONOSCERE I PUNTI DEL TERRENO (FONTE:ELABORAZIONE DATI AGISOFT PHOTOSCAN) 72
FIGURA 52: CLUSTER CON PUNTI RILEVATA CON TECNOLOGIA SLAM E CIRCONFERENZA MEDIA DEL SINGOLO INDIVIDUO 73
FIGURA 53: AREE DI COMPETENZA CON CENTROIDI (IN GIALLO) SU BASE DTM (GROUND) CON RISPETTIVE AREE DI COMPETENZA (GRIGIE) 74
FIGURA 54: PERIMETRO DELL'INCENDIO DELLE CESANE RILEVATO CON METODI E/O STRUMENTI DIVERSI 75
FIGURA 55: DISTRIBUZIONE SPAZIALE (SOPRA) E QUANTITATIVA (SOTTO) DELLE CATEGORIE FORESTALI NELL'AREA INCENDIATA (IPLA, 2001); 76
FIGURA 56: CARTA DELLA SEVERITÀ DELL'INCENDIO DELLE CESANE OTTENUTA UTILIZZANDO DNBR SU IMMAGINI SENTINEL-2 (IN ALTO) E LANDSAT (IN BASSO) 77
FIGURA 57: DISTRIBUZIONE IN VALORI ASSOLUTI (IN ALTO) E IN PERCENTUALE (IN BASSO) DELLA SUPERFICIE DELL'INCENDIO IN CLASSI DI SEVERITÀ 78
FIGURA 58:CLASSI DI SEVERITÀ PER CATEGORIA FORESTALE 79
FIGURA 59:VARIAZIONE DEI VALORI NDMI CALCOLATI PER OGNI CLASSE DI SEVERITÀ (NEL PERIODO COMPRESO FRA 31-05-2017 E 16-10-2019 NELL'AREA BRUCIATA DELLE CESANE) 80
FIGURA 60: VARIAZIONE DEI VALORI NDVI CALCOLATI PER OGNI CLASSE DI SEVERITÀ (NEL PERIODO COMPRESO FRA 31-05-2017 E 16-10-2019 NELL'AREA BRUCIATA DELLE CESANE) 81

FIGURA 61: VARIAZIONE DEI VALORI NBR2 CALCOLATI PER OGNI CLASSE DI SEVERITÀ (NEL PERIODO COMPRESO FRA 31-05-2017 E 16-10-2019 NELL'AREA BRUCIATA DELLE CESANE) 81
FIGURA 62: PINETA DI PINO NERO ALLE CESANE PERCORSA DAL FUOCO NEL MESE DI LUGLIO 2017 CON COPERTURA ERBACEA DIFFUSA FRA GLI INDIVIDUI DI PINO MORTI (RILIEVO DEL 5-07-2019) 82
FIGURA 63:ANDAMENTO DEI VALORI DI NDVI DISTINTI PER CATEGORIA FORESTALE NEL PERIODO COMPRESO FRA 31-05-2017 E 16-10-2019. 84
FIGURA 64: ANDAMENTO DEI VALORI DI NBR2 DISTINTI PER CATEGORIA FORESTALE NEL PERIODO COMPRESO FRA 31-05-2017 E 16-10-2019 84
FIGURA 65: DIGITAL TERRAIN MODEL COSTRUITO PER UNA PORZIONE DELL'AREA BRUCIATA NELLA FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE 85
FIGURA 66: CARTA OMBREGGIAMENTO DA DTM PER UNA PORZIONE DELL'AREA BRUCIATA NELLA FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE. 86
FIGURA 67: CARTA DELLA PENDENZA DA DTM PER UNA PORZIONE DELL'AREA BRUCIATA NELLA FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE. 86
FIGURA 68: CARTA RILIEVO CON CON CURVE DI LIVELLO PRINCIPALI (EQUIDISTANZA 10M) DA DTM PER UNA PORZIONE DELL'AREA BRUCIATA NELLA FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE. 87
FIGURA 69: DIGITAL TERRAIN MODEL COSTRUITO PER UNA PORZIONE DELL'AREA BRUCIATA NELLA FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE. RILIEVO DEL 5-07-2019 88
FIGURA 70: ORTOFOTO COSTRUITA PER UNA PORZIONE DELL'AREA BRUCIATA NELLA FORESTA DEMANIALE DELLE CESANE. RILIEVO DEL 5-07-2019 88
FIGURA 71: CENTROIDI DEGLI INDIVIDUI RILEVATI CON TECNOLOGIA SLAM 89
FIGURA 72: DISTRIBUZIONE DI FREQUENZA DEI DIAMETRI DEL FUSTO RILEVATI CON SLAM ALLE CESANE 90
FIGURA 73:CURVA IPSOMETRICA DEL POPOLAMENTO CHE MOSTRA LA VARIAZIONE DELL'ALTEZZA DEGLI ALBERI IN FUNZIONE DELLA CLASSE DIAMETRICA INDIVIDUATI CON TECNOLOGIA SLAM 91
FIGURA 74: INDICE DI INFIAMMABILITÀ NELLE DIVERSE CATEGORIE FORESTALI A LIVELLO NAZIONALE (FONTE:CORONA ET AL. 2014) 94
FIGURA 75: UN TRATTO DELLA PINETA DELLE CESANE SUBITO DOPO L'INCENDIO DEL LUGLIO 2017 95
FIGURA 76: RICACCIO VEGETATIVO BASALE DI ORNIELLO (FRAXINUS ORNUS) POCHE SETTIMANE DOPO L'INCENDIO (FOTO 9-09-2017) 96
FIGURA 77: TRAIETTORIA SPIRALE USCENTE DA UTILIZZARE NEL RILIEVO IN CAMPO CON TECNOLOGIA SLAM 98

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

LiDAR	Light Detection and Ranging
GIS	Sistemi di Informazione Geografica
Rs	Remote Sensing
APR	Aereomobile a pilotaggio remoto
UAV	Unmanned aerial vehicle
DTM	Modello digitale del terreno
EM	Energia elettromagnetica
PAR	Photosyntetically Active Radiation
IFOV	Instantaneous field of view
TLR	Telerilevamento
NBR	Normalized Burn Ratio
d*NBR*	Delta Normalized Burn Ratio
RDNBR	Relative Delta Normalized Burn Rati
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
SVI	Spectral Vegetation Index
NDMI	Normalized Difference Moisture Index
GCP	Ground Control Point
GNSS	Global Navigation Satellite System
IMU	Inertial Measurement Unit
TOF	Time Of Flight
DTM	Digital Terrain Model
MLS	Mobile Laser Scanning
BOA	Botton Of Atmosphere
RTK	Real Time Kinematic
FOV	Field Of View
TOA	Top Of Atmosphere
ALS	Airborne Laser Scanning
TLS	Terrestrial Laser Scanning

INTRODUZIONE

Le foreste forniscono molteplici servizi ecosistemici che dovrebbero soddisfare, direttamente o indirettamente, le necessità dell'uomo e garantire la vita di tutte le specie in esse presenti.

Negli ultimi 50 anni l'uomo ha modificato gli ecosistemi con una velocità e una forza che non si erano mai osservate nei decenni precedenti, con una perdita irreversibile di biodiversità in tutto il pianeta e, in particolare, è stato valutato che il 60% dei servizi offerti siano già stati compromessi (Life, 2019).

In Italia il miglioramento delle condizioni di vita ha portato a modificare l'uso delle foreste che oggi sono maggiormente tutelate sia sul piano tecnico sia su quello giuridico. Ciononostante, in questi ultimi tempi alcuni disturbi come gli incendi boschivi o gli schianti da vento o neve hanno causato notevoli danni economici ed ambientali destato molte preoccupazioni nell'opinione pubblica.

Relativamente agli incendi forestali, l'anno 2017 è stato il più critico dell'ultimo decennio e tra quelli con i danni più gravi a partire dal 1980, per un totale di superficie percorsa dal fuoco pari a oltre 160.000 ha, con circa 8.000 eventi. A livello nazionale la superficie mediamente percorsa dal fuoco in ciascun singolo evento è stata pari a oltre 14 ha, valore nettamente superiore a quello mediamente riscontrato negli ultimi due decenni, a testimonianza della particolare gravità assunta dal fenomeno nel 2017 (Rete Rurale Nazionale, 2018).

L'intensità e la frequenza di tali disturbi sulle foreste possono essere tali da investire tutte le loro molteplici funzioni, procurando danni diretti ed indiretti. Da qui la necessità di disporre di dati dettagliati sullo stato attuale, nonché sui cambiamenti avvenuti in seguito ad un disturbo e sulle dinamiche di recupero degli ecosistemi interessati.

La fotogrammetria, l'evoluzione dei sensori multispettrali e la prospettiva di sviluppo dei sensori iperspettrali nel campo del telerilevamento ottico, offrono così nuovi strumenti per l'indagine del territorio a seguito di un disturbo e rinnovano la necessità di ridefinire potenzialità, limiti e accuratezza delle metodologie tradizionali (Mandanici, 2011).

L'analisi di immagini satellitari consente un sistematico ed efficiente processo di controllo nel tempo delle diverse risorse naturali, ambientali e del territorio. Rispetto ai soli rilievi in campo

il metodo permette di mappare ampie aree a costi contenuti in tempi rapidi e di ottenere informazioni spazializzate e georiferite. Inoltre, il telerilevamento permette di applicare analisi storiche, utilizzando i dati disponibili acquisiti in epoche precedenti.

Fra le varie in uso, la tecnologia LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) rappresenta un ottimo esempio di come gli strumenti hi-tech possano essere un valido alleato della silvicoltura e dell'agricoltura moderna, migliorando la qualità del lavoro di pianificazione e monitoraggio ambientale.

Tutte le esperienze condotte finora evidenziano le grandi potenzialità fornite dall'utilizzo di queste tecnologie a supporto della gestione forestale: ad esempio offrono la possibilità di localizzare in modo automatico ogni singolo albero all'interno di una foresta, di misurarne le diverse variabili dendrometriche, ma non solo. Con la tecnologia LiDAR è possibile spingere il rilevamento oltre le chiome e raggiungere il suolo per ricostruire modelli tridimensionali del terreno con un grado di risoluzione elevato (Ciceri, 2014).

Combinando quindi, dati dall'Osservazione della Terra (immagini satellitari multi/iper spettrali), tecnologie Laser e i Sistemi di Informazione Geografica (GIS) è possibile ottenere informazioni qualitative e quantitative sullo stato fisiologico della vegetazione, valutarne il danno e studiarne lo sviluppo nel tempo.

Il tema degli incendi forestali ha assunto un'importanza via via crescente in tutta Europa, in particolare nel contesto del bacino del Mediterraneo, considerate le condizioni climatiche prevalenti (Rete Rurale Nazionale, 2018). L'utilizzo di queste tecnologie e, di indici di vegetazione derivati, possono contribuire significativamente ad una migliore rappresentazione ed analisi della superficie terrestre a costi sempre più accessibili, fornendo dati per valutare gli andamenti dei regimi di incendio ed agire sui loro potenziali impatti favorendo il recupero ambientale.

CAPITOLO 1
IL FUOCO COME FATTORE ECOLOGICO: CONTESTUALIZZAZIONE E MONITORAGGIO POST-DISTURBO

1.1 **Il fuoco come fattore di disturbo nelle foreste**

In ecologia forestale viene considerato un disturbo "*qualsiasi evento relativamente discreto nel tempo che rompe la struttura di un ecosistema, di una comunità o di una popolazione e cambia la disponibilità di risorse dell'ambiente fisico*" *(White e Pickett 1985).*

I disturbi sono parte integrante di tutti i sistemi ecologici e incidono sul paesaggio come *drivers* dell'eterogeneità spaziale e temporale modificando la dinamica di un sistema e creando i cosidetti mosaici ambientali che gli ecologisti hanno da tempo riconosciuto come motore essenziale del modello di paesaggio.

Relativamente al rapporto fra distribuzione della vegetazione potenziale e reale, il fuoco viene indicato fra i principali fattori dei biomi e determinante nella struttura della comunità (Trabaud Prodon, R, 1993).

Molti paesaggi sono dominati da ecosistemi in cui il fuoco è un elemento naturale e necessario per la sostenibilità a lungo termine del sistema stesso, capace di modellare l'ambiente e condizionare l'assetto del paesaggio vegetale, costituito da un mosaico di stadi in fase di rigenerazione e di degradazione.

Nei biomi di tundra e di taiga, il fuoco è ancora in prevalenza di origine naturale e provocato da fulmini sulla vegetazione secca dello strato erbaceo-arbustivo alla fine dell'inverno. Nelle regioni temperate e mediterranee, l'origine del fuoco è invece prevalentemente attribuibile alla presenza ultramillenaria dell'uomo e delle sue attività. Queste, nel tempo, hanno modificato i paesaggi, la tipologia e la continuità delle coperture vegetali e di conseguenza anche la quantità di combustibile disponibile.

I regimi d'incendio appaiono modificati nel corso della storia, specialmente in relazione ai cambiamenti del clima oltre che dalle attività umane, e ad oggi nell'area mediterranea, in un contesto di aumento progressivo della popolazione e di tendenziale riscaldamento climatico, il ruolo del fuoco e le relative variazioni della frequenza degli incendi, assumono un'importanza fondamentale per la comprensione dei processi di conservazione degli equilibri ecosistemici.

Il clima mediterraneo, in particolare, caratterizzato da una forte siccità estiva, determina un elevato rischio di incendi boschivi, a differenza di quanto avviene in altri contesti dell'area delle foreste temperate (Trabaud Prodon, 1993).
Il fuoco è benefico per la vegetazione, per la biodiversità e il suolo quando è ben adattato alle condizioni naturali, ma come si è detto, può avere anche "carattere distruttivo", e tale impatto dipende dal suo comportamento, dal contesto temporale e spaziale che va ad alterare la risposta idrologica del suolo, determinando nelle aree percorse da incendio boschivo un aumento del deflusso e dell'erosione idrica.
L'eterogeneità spaziale svolge un ruolo chiave nel controllo della propagazione degli incendi boschivi, altresì gli effetti del fuoco sulla vegetazione, sul suolo, sull'atmosfera, dipendono fortemente dalle sue principali caratteristiche (Turner and Gardner, 2015):

- *Frequenza*: numero di eventi che si verificano nella stessa area in un determinato arco temporale;
- *Tempo di ritorno*: tempo che intercorre tra due eventi successivi (inverso della frequenza);
- *Stagionalità*: il periodo nel quale si verificano maggiormente gli incendi;
- *Durata*: tempo di permanenza, in ore o giorni;
- *Dimensione*: area soggetta al disturbo;
- *Intensità*: magnitudo della forza fisica ovvero la quantità di energia per area di combustione;
- *Severità*: magnitudo dell'impatto prodotto dal fuoco sull'ecosistema che a sua volta influisce sui modelli di rigenerazione e sulle emissioni di biomassa.

Per descrivere un disturbo e comprenderne il ruolo nel determinare le dinamiche forestali è importante analizzare la componente spaziale del fenomeno (Favero, *et al*., 2019).
La dimensione dell'area interessata dal fuoco, ad esempio, spiega l'impatto globale del fuoco sul modello del paesaggio, sia che si tratti di incendi frequenti e piccoli o sporadici e di grandi dimensioni, creando mosaici spaziali diversi (Neary, *et al*, 2005).
Anche la forma e la dimensione di un incendio costituiscono una caratteristica importante per valutare la resilienza del sistema colpito. La lunghezza e la complessità dei margini dell'area interessata dal fuoco sono una componente essenziale per la ricolonizzazione da parte delle specie vegetali di un popolamento limitrofo.
Il bosco, visto come un sistema resiliente, cerca di sfruttare tutte le capacità per assimilare i cambiamenti e corrispondere a più avanzati livelli di stabilità.

Per questo motivo, lo studio dei processi successionali post-disturbo è utile per comprendere gli effetti potenziali degli incendi, nonché per prevedere i futuri scenari di impatto a seguito di cambiamenti climatici e socioeconomici.

1.2 **Gli incendi in Italia nel 2017**

L'Italia ha una superficie forestale che copre circa il 34.7% di quella nazionale. Di questa i boschi veri e propri ne rappresentano l'83.7% mentre, le altre terre boscate e la macchia mediterranea il 16.3% (Figura 1) (INFC, 2017).

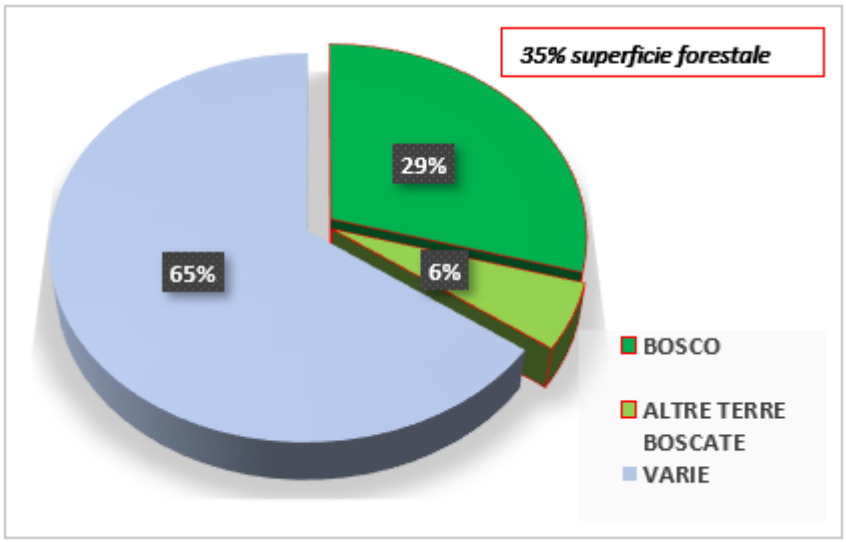


Figura 1: Ripartizione della superficie nazionale per macrocategorie inventariali (Fonte: elaborazione dati INFC 2017)

Gli incendi sono l'espressione di problematiche socioeconomiche legate ad una complessa interazione di fattori predisponenti (condizioni climatiche, quantità e qualità di combustibile, caratteristiche territoriali) e cause determinanti (immissione di energia termica ad alto potenziale) e di fattori di innesco che, nella maggior parte dei casi, sono di origine antropica volontaria o involontaria (Battipaglia *et al.*, 2017).

Nel 2017 secondo dati ufficiali, in Italia si sono verificati complessivamente 7855 incendi che hanno bruciato 161 987 ha di superficie agro-forestale. Il totale annuale è stato il più alto dal 2007 (Figura 3) (Arlunno, 2018) (EFFIS, 2018). Il maggior numero di incendi si è verificato in Calabria (1.488), ma la maggiore superficie interessata è stata in Sicilia (21.1%). Questi dati rispecchiano la situazione storica del periodo 2009 – 2016 (Figura 2).

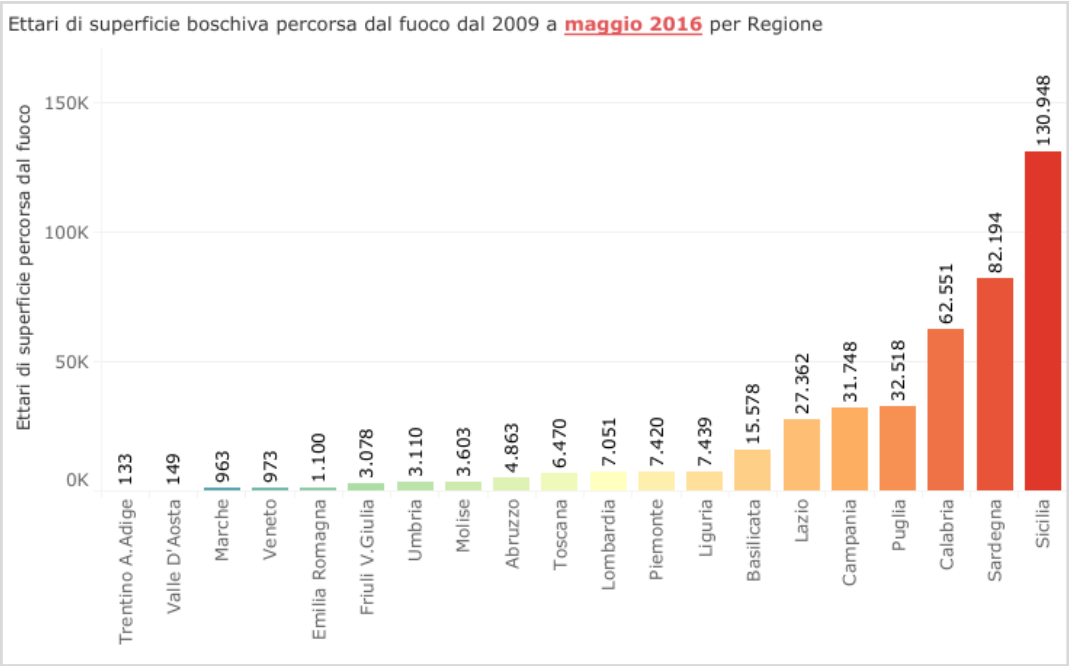


Figura 2: Superficie boschiva (in migliaia di ha) percorsa dal fuoco per regione. Periodo gennaio 2009 - maggio 2016. (fonte: OpenDataSicilia)

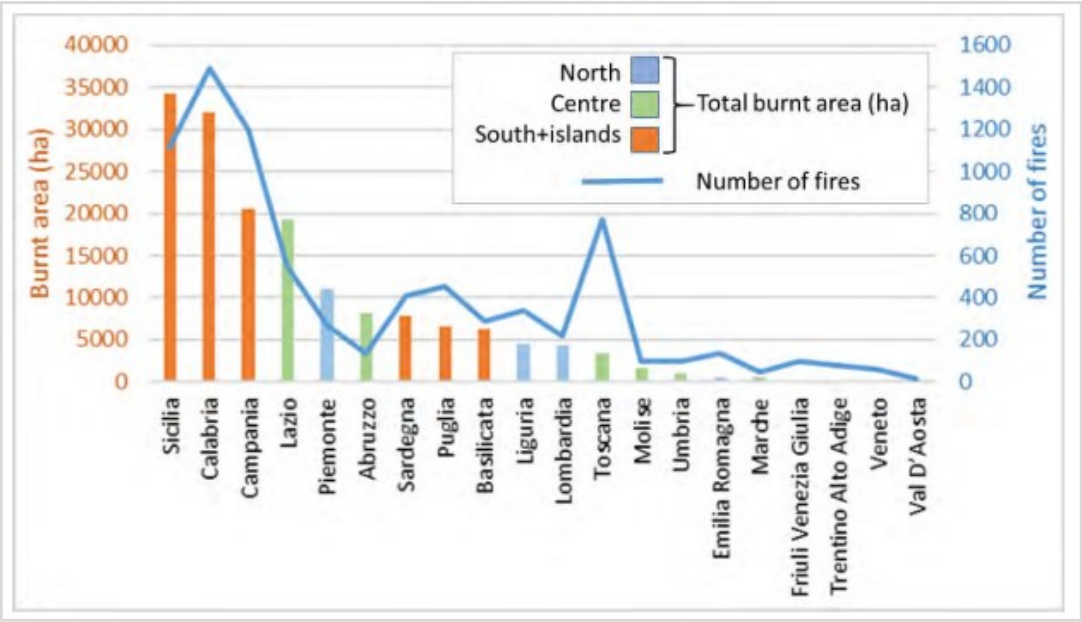


Figura 3: Numero di incendi ed area bruciata per regione nel 2017 (fonte: Effis 2018)

Gli incendi boschivi, hanno un andamento pressoché stagionale confermato dai dati storici relativi al periodo 1990 – 2008, caratterizzato da numerosi episodi di fuoco ad alta frequenza,

diminuiti durante l'ultimo decennio con picchi elevati nel 2007, anno particolarmente siccitoso (Michetti and Pinar, 2013) (Figura 4).

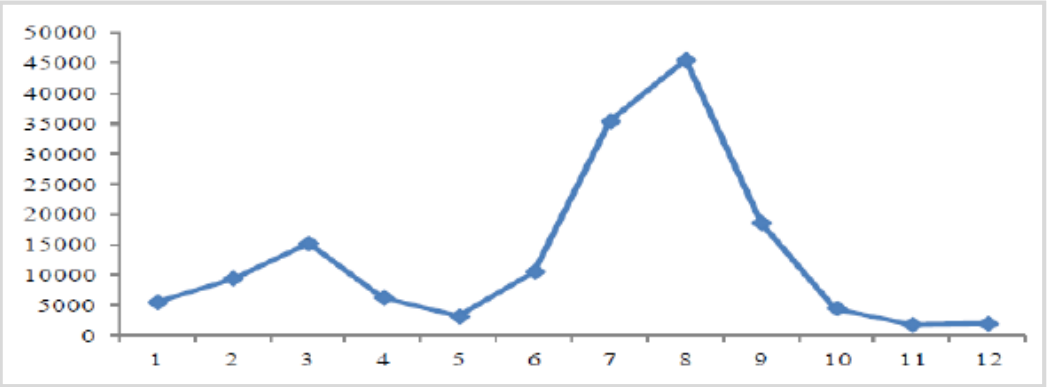


Figura 4: Stagionalità degli incendi (1990 - 2008). In ascissa sono rappresentati i mesi dell'anno e in ordinata il numero medio mensile di incendi (fonte: Michetti *et al*. 2013).

Negli ultimi 10 anni, si era affermato un netto miglioramento, sia per numero di eventi, sia per superfici percorse: nel 2003 gli incendi colpivano oltre un comune su quattro (>25%), nel biennio 2004-2005 il 19% e nel 2006 il 17% dei comuni italiani (Legambiente, 2006).

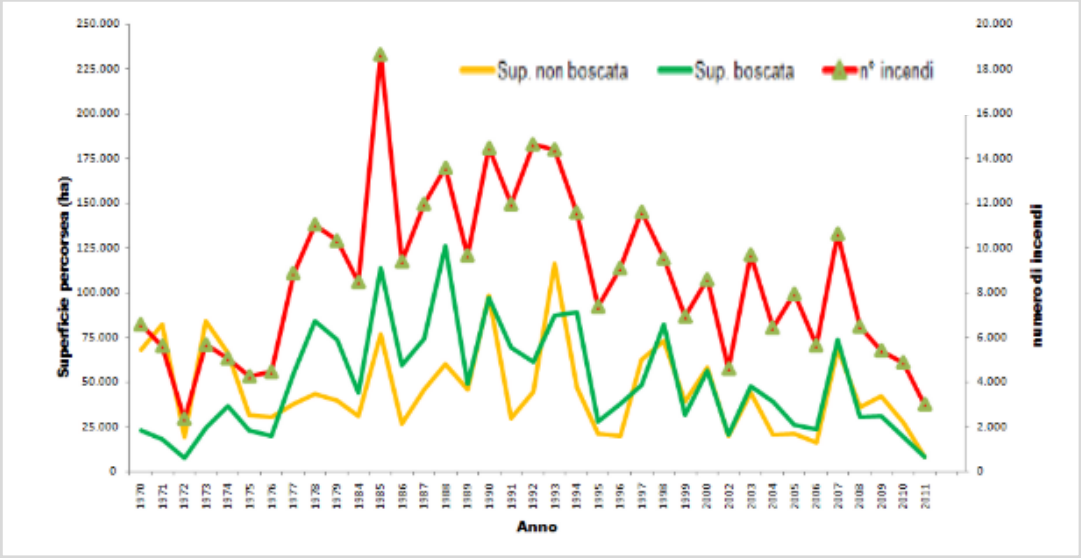


Figura 5: Numero di incendi in Italia distinto per superficie boscata e non boscata per il periodo 1961 – 2010 (fonte: Lovreglio *et.al* – Forest@ 9: 137-147).

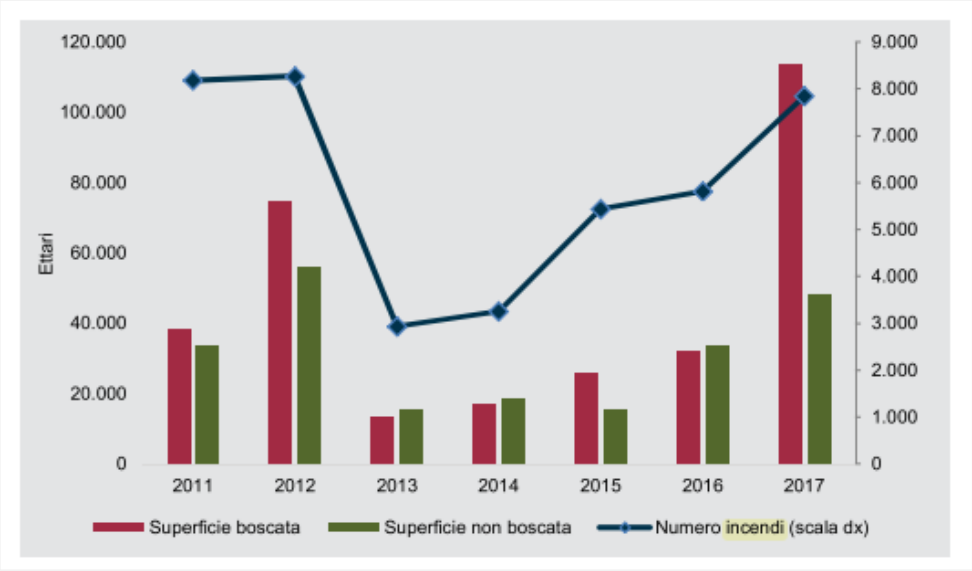


Figura 6:Numero di incendi (asse ordinata a destra) e superfici (ha) boscata e non boscata (asse ordinata a sinistra) percorse dal fuoco - Anni 2011 - 2017 (Fonte: Annuario statistico 2018: 39)

La superficie forestale media percorsa dal fuoco nel 2017 è stata di 7,6 ettari contro gli 11,1 del 2014 e i 9,9 del 2013, mentre l'incidenza della superficie boscata sulla totalità della superficie percorsa dal fuoco è del 62,3 %, in aumento rispetto allo scorso anno quando è stata del 47,9 % (Arlunno, 2018).

I primi mesi del 2017 sono stati caratterizzati da fenomeni distribuiti lungo la penisola determinati anche da un diffuso deficit idrico e da un'intensificazione, rispetto al passato, degli interventi di spegnimento anche da parte della flotta aerea antincendio dello Stato (a volte ingiustificati) al punto da risultare la stagione più complicata dal 2004, dopo quella del 2012 (Legambiente, 2017).

Gli incendi boschivi causano la perdita di migliaia di ettari di questo immenso patrimonio e non risparmiano le aree forestali che coprono oltre il 50% dei parchi e delle riserve naturali, come dimostrano i numerosi ettari bruciati nei parchi nazionali di Majella, Vesuvio, Gargano, Alta Murgia, Pollino Sila, Aspromonte con ingenti danni al patrimonio di biodiversità e rischi per l'incolumità delle persone e dei beni (Figura 6) (Legambiente, 2017).

Se le temperature elevate e la scarsa manutenzione dei boschi rappresentano un mix esplosivo per l'innesco, è opportuno specificare che gli incendi non avvengono solo d'estate e molto spesso per opera della mano criminale dell'uomo o per negligenza dello stesso.

Infatti, rispetto al passato, il fenomeno incendi sta cambiando perché l'ambiente forestale e le sue interazioni con il clima e la società hanno nuove connotazioni.

La stagione incendi è sempre più lunga, ed eventi meteorologici estremi come ondate di calore e siccità sono più frequenti e aumentano lo stress idrico della vegetazione rendendola altamente infiammabile (Bovio *et al.*, 2017) (Figura 7).

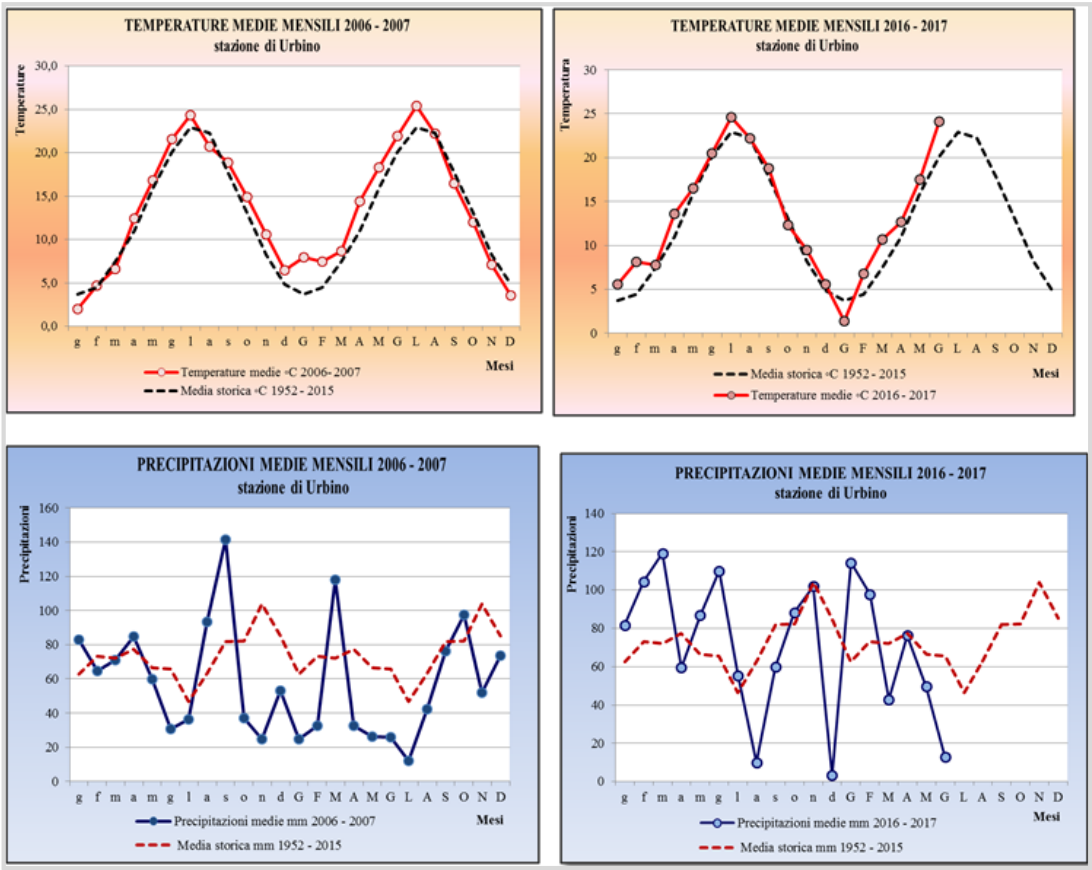


Figura 7:Temperature medie e precipitazioni cumulate mensili per gli anni 2006-2007 / 2016-2017 in relazione alle medie del periodo 1952-2015 per la stazione di Urbino.(Fonte Brutti, 2017).

Il cambiamento del regime di incendi richiede un cambio di strategie di governo del fenomeno. L'abbandono colturale in aree marginali e la diffusione di arbusteti hanno aumentato la vulnerabilità del territorio. La riduzione degli interventi selvicolturali determina spesso la diffusione di patogeni con il conseguente disseccamento degli alberi e l'aumento del rischio incendi (Battipaglia *et al.*, 2017).

I boschi italiani si stanno espandendo spontaneamente di circa 30.000 ettari all'anno, originando formazioni preforestali e boschi di neoformazione particolarmente sensibili per tipologia e ubicazione al rischio incendio (Bovio *et al.*, 2017). Si richiede, una gestione dei boschi in funzione della loro ecologia e dei servizi che forniscono alle comunità e alla collettività.

Il monitoraggio post-disturbo è un processo indispensabile per valutare l'impatto di un incendio boschivo sull'ecosistema e, per orientare gli eventuali interventi di ripristino ambientale. È utile ricordare peraltro che le superfici percorse da incendi boschivi devono essere ufficialmente censite e sottoposto ad un vincolo assoluto che esclude qualsiasi intervento di recupero salvo la messa in sicurezza di infrastrutture e manufatti.

Le tecnologie a supporto del monitoraggio post-incendio sono notevolmente aumentate e migliorate nel tempo ed utilizzano tecniche e processi volti a ottimizzare eventuali interventi sito-specifici, sulla base delle caratteristiche spaziali e temporali dell'evento e della variabilità delle componenti ecosistemiche.

Le tecnologie di telerilevamento (*Remote Sensing*) sono oggi disponibili e fondamentali per il miglioramento della qualità ambientale offrendo misure, azioni e processi altamente ripetibili (Giannetti, 2017).

I rilievi da remoto con strumentazione a sensori passivi (nel campo del visibile o con multispettrale) e attivi (laser scanner – LiDAR) consentono di mappare con estrema precisione il perimetro dell'area interessata dal fuoco, valutarne la severità, analizzare il cambiamento bitemporale dell'area confrontando immagini pre e post -incendio.

Oltre alla mappatura dei perimetri dell'incendio, le tecnologie a supporto offrono infatti una notevole potenzialità nell'analisi delle dinamiche post–disturbo, come eventuali rischi idrogeologici e la possibilità di rigenerazione della copertura vegetale.

1.2.1 *Telerilevamento: immagini multispettrali satellitari*

Il telerilevamento o *Remote Sensing* studia la realtà dal punto di vista spettrale e radiometrico comprendendo tutte quelle tecniche basate sull'utilizzo di strumenti per l'acquisizione e la misura di dati/informazioni spazialmente organizzate (Brivio, *et.al*., 2006; Marcolin *et al.*, 2011).

Con l'invenzione del telescopio (1609) e la scoperta della fotografia (1838) l'uomo acquisì la capacità di migliorare le sue possibilità di osservazione del mondo reale.

Il telerilevamento, a tutti gli effetti, nacque con lo sviluppo tecnologico a seguito della Seconda guerra mondiale e prese il decisivo avvio negli anni '60, con le prime immagini della Terra trasmesse dal satellite TIROS-1.

L'effettiva possibilità di osservare la superficie della terra dall'alto si è potuta realizzare soltanto con gli sviluppi della tecnologia aerospaziale. Allo stesso tempo, i risultati ottenuti nei campi della fotografia, dell'ottica, e dell'elettronica hanno permesso di estendere la capacità di indagine oltre il visibile, offrendo all'uomo nuovi strumenti per l'osservazione del suo ambiente: le *radiazioni elettromagnetiche*. Gli oggetti infatti interagiscono con l'energia

elettromagnetica riflettendo, assorbendo ed emettendo in maniera diversa alle diverse lunghezze d'onda. È questo il principio fisico basa su cui si basa il telerilevamento.
Gli intervalli principali dello spettro elettromagnetico, utilizzati per il rilevamento delle risorse terrestri sono compresi tra circa 0,4 e 12 µm (l'intervallo visibile / infrarosso) e tra 30 e 300 mm (microonde)(Richards and Jia, 2006) (Figura 8).

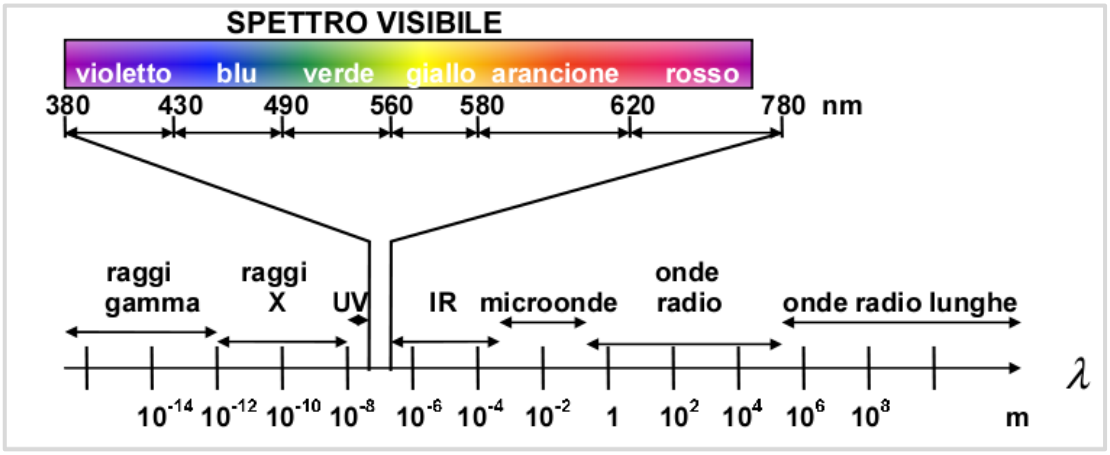


Figura 8: Spettro elettromagnetico (Wikipedia.png, 2012).

È possibile discriminare le diverse superfici (suolo, vegetazione, acqua ecc.) e di riconoscere le loro caratteristiche (umidità, stato di salute, concentrazione dei nutrienti ecc.) analizzando il diverso comportamento spettrale nelle varie lunghezze d'onda ovvero la loro *Firma Spettrale* (Figura 9).

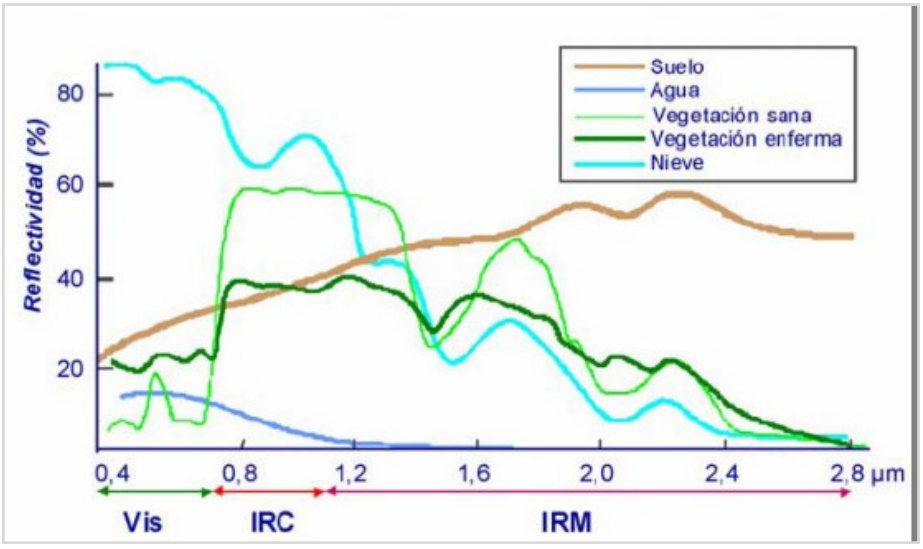


Figura 9: Esempi di Firme spettrali di diverse superfici (CGT, s.d.).

Il telerilevamento con sensori multispettrali è risultato negli anni, uno strumento essenziale per analizzare le modalità, e i tempi necessari per la ricostituzione dei popolamenti forestali in seguito al passaggio di un incendio ma altresì per caratterizzarne la severità, che costituisce un elemento chiave per la definizione della necessità e delle modalità di intervento nelle aree percorse da incendio (Marcolin *et al.*, 2011).

L'efficacia del TLS *(Terrestrial Laser Scanner)* è resa possibile, in funzione della stretta correlazione esistente tra severità e processi di ricostituzione post-incendio, mettendo in evidenza le diverse risposte spettrali della vegetazione determinate prevalentemente dall'apparato fogliare, la cui struttura e attività ne condiziona l'utilizzo della radiazione solare (Dessena & Melis, 2006).

Nella regione del visibile le foglie hanno una bassa riflettività, in quanto gran parte della radiazione viene assorbita dai pigmenti fogliari (clorofilla a e b), per questo viene indicata come PAR (*Photosynthetic Active Radiation*), ovvero radiazione utile per i processi fotosintetici.

Nella regione dell'infrarosso invece, la radiazione viene riflessa o trasmessa, a causa dei fenomeni di scattering da parte delle pareti cellulari e della loro struttura. La regione di passaggio (chiamata *Red-Edge*) dagli assorbimenti del rosso alle forti riflessioni dell'infrarosso è fortemente influenzata dalle caratteristiche biochimiche delle foglie, dalla struttura della chioma e dallo stato complessivo della pianta. Per questo motivo rappresenta una regione spettrale altamente diagnostica per discriminare le varie specie vegetali e il loro stato fitosanitario (Dessena & Melis, 2006)(Figura 10).

Oltre che dalla composizione chimica e della struttura fogliare, la risposta spettrale dipende anche dal grado di copertura (*canopy*) e dal IFOV (*Istantaneous Field Of View*).

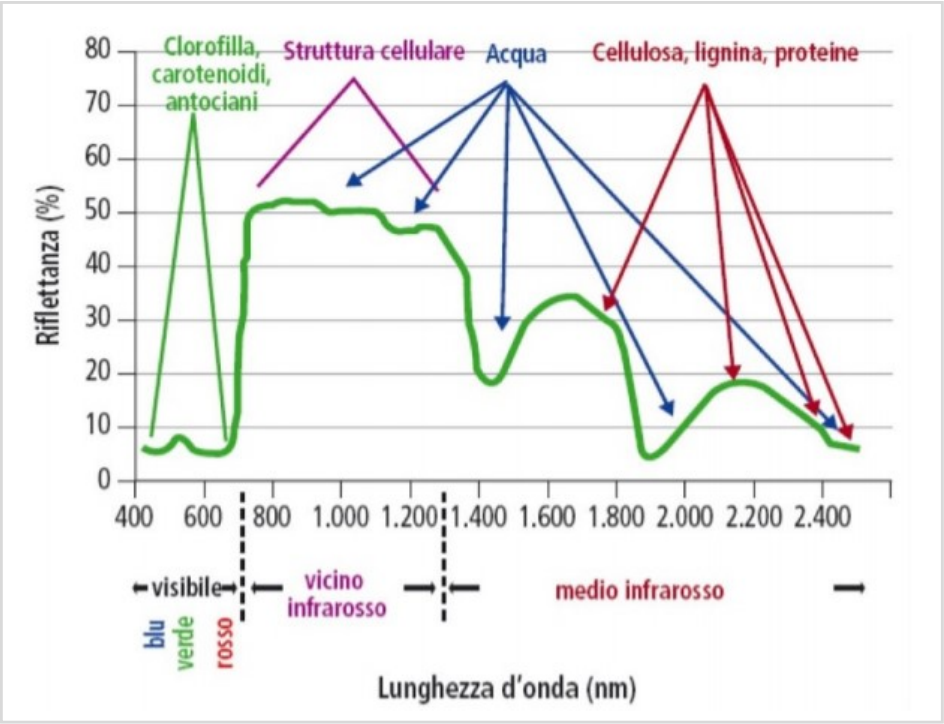


Figura 10: Firma spettrale della vegetazione. I pigmenti fogliari e la composizione influenzano la risposta nel Visibile (0.4-0.7 µm); la struttura interna delle foglie e la disposizione delle cellule nell'Infrarosso vicino (0.75-1.3µm); il contenuto d'acqua nell'Infrarosso a onde corte (1.3-2.5 µm)

In un sistema di telerilevamento, l'energia emanata da qualsiasi superficie terrestre viene misurata utilizzando un qualunque dispositivo (comunemente chiamato sensore), montato su satelliti, in orbita oppure aviotrasportati, in grado di rilevare, registrare e convertire tale energia in informazione utile per le successive analisi.

Da punto di vista spaziale il sensore copre generalmente una porzione o area della superficie terrestre detto 'campo di vista' (*field of view*) espresso da un angolo di apertura, con un'impronta W al suolo (*swath width*) funzione dell'angolo e della quota altimetrica.

Le componenti essenziali coinvolte in un sistema di telerilevamento sono (Figura 11):

- *Sorgente di energia*: questa può essere naturale (come il Sole o la Terra stessa) o artificiale (come flash). Le caratteristiche della sorgente luminosa sono uno degli aspetti fondamentali nella catena del telerilevamento;
- *Interazione con la superficie terrestre*. La quantità e le caratteristiche della radiazione riflessa o emessa dalla Terra sono funzione delle diverse interazioni con l'atmosfera e delle caratteristiche del corpo stesso;
- *Interazione con l'atmosfera*. Le radiazioni elettromagnetiche interagendo con i suoi costituenti possono subire delle modificazioni e distorsioni (es. *scattering*)
- *Sensori e rilevatori*. Strumenti di misura della radiazione riflessa;

- *Processi di elaborazione e interpretazione*. È la componente finale del sistema e consiste nell'elaborazione dei dati sviluppando modelli interpretativi e metodologie per la fotointerpretazione.

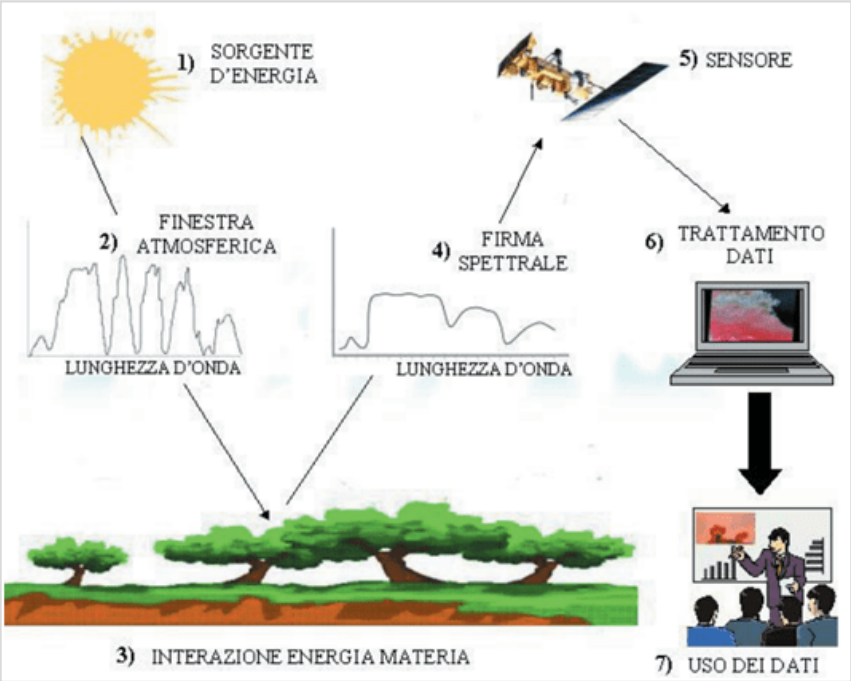


Figura 11: Componenti di un sistema di Telerilevamento (Altobelli, 2018)

In generale i sensori in base alla sorgente luminosa possono essere classificati:

- *Passivi*: se misurano la firma spettrale della radiazione elettromagnetica emessa (emissività) o riflessa (riflettanza) a partire da sorgenti elettromagnetiche naturali come il sole o proveniente dalle superfici investigate.
- *Attivi*: se provvedono essi stessi all'illuminazione elettromagnetica delle superfici di interesse, captando poi la radiazione elettromagnetica di ritorno misurandone ancora una volta la firma spettrale in termini di riflettanza, come ad esempio nel caso dei radar.

Sotto il punto di vista delle regioni dello spettro elettromagnetico indagate, invece, i sensori si possono ulteriormente suddividere in:

- *pancromatici:* utilizzano tutta la banda dello spettro visibile; hanno un'alta risoluzione spaziale;
- *multispettrali:* utilizzano solitamente 3-7 bande spettrali, dove spesso sono presenti le bande RGB; tendono ad avere una bassa risoluzione spaziale (> 1 metro);

- *iperspettrali:* utilizzano un elevato numero di bande spettrali (solitamente superiore al centinaio); larghezze di banda intorno a 0,1-0,2 µm; bassa risoluzione spaziale.

L'evoluzione dei sensori multispettrali e la prospettiva di sviluppo dei sensori iperspettrali nel campo del telerilevamento ottico offrono nuovi strumenti utili per indagare il territorio.
I dati raccolti dagli strumenti del telerilevamento vengono elaborati attraverso opportune metodiche per ottenere informazioni sulle caratteristiche e lo stato di salute delle superfici indagate. L'esito finale del processo, nonché la fase più critica, è generalmente la produzione di mappe che forniscono informazioni utili per chi si occupa di studio e gestione dell'ambiente.
Come nella fotogrammetria, un'immagine telerilevata ripresa con strumenti digitali corrisponde a una matrice di elementi discreti detti *pixel*, le cui dimensioni al suolo variano a seconda delle caratteristiche del sensore e della distanza di osservazione.
Ad ogni pixel corrisponde una misura di radianza, cioè di energia elettromagnetica proveniente dall'area elementare risolta al suolo in una determinata porzione dello spettro, denominata banda. Ogni pixel costituente l'immagine *raster* risulta quindi caratterizzato da una terna di valori (Figura 12):

- le due variabili spaziali x e y, corrispondenti agli indici di riga e di colonna, che individuano la posizione del pixel all'interno dell'immagine;
- il DN, correlato all'intensità della radianza al suolo, che indica il valore del livello di grigio assunto da ogni singolo pixel.

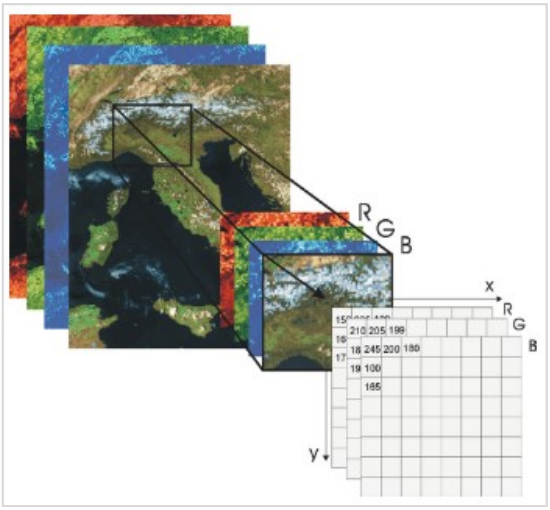


Figura 12:Immagine multispettrale con le tre bande relative alla porzione di spettro del visibile (rosso, verde e blu) e le corrispondenti tre matrici di valori numerici (Paciello, 2015).

Fra le caratteristiche più importanti dei sistemi di osservazione sono le diverse specifiche di risoluzione legate alla capacità di descrivere la scena indagata in termini di:

- → *Risoluzione geometrica*: quantifica il livello dei dettagli riconoscibili al suolo ed esprime il dettaglio raggiungibile da un certo sistema di ripresa;
- → *Risoluzione spettrale*: capacità del sistema di ripresa che viene utilizzato di rilevare la radiazione elettromagnetica su diverse porzioni dello spettro elettromagnetico, permettendo così di ottenere immagini multispettrali;
- → *Risoluzione radiometrica*: sensibilità della misura, ovvero la variazione minima nella misura che il sistema riesce a rilevare. È legata al processo di discretizzazione del dato radiometrico, ossia al numero dei livelli con cui viene quantizzato il segnale nella conversione da analogico a digitale; tali livelli discreti rappresentano i livelli di grigio assegnati ai pixel, (DN);
- → *Risoluzione temporale*: frequenza con la quale il sensore passa sulla stessa area con la possibilità di ripetere le osservazioni a cadenze temporali costanti o programmabili.

Il telerilevamento come strumento di monitoraggio *post-fire* consente l'estrazione di variabili indipendenti per prevedere variabili dipendenti, come gli stadi di successione, l'età del popolamento, il diametro e l'altezza degli alberi, la biomassa, la chiusura della chioma, la diversità delle specie e altri parametri strutturali su ampie aree di foresta (Chu e Guo, 2013).

1.2.2 *Fotogrammetria*

Tra i vari metodi di rilevamento in uso, la fotogrammetria affermatasi nell'ultimo cinquantennio, rappresenta il metodo più completo e preciso, a parità di costi e rapidità, rispetto ad altri metodi di rilievo del territorio (Fichera, 2016).

La fotogrammetria può essere definita come la scienza di rilievo che permette di ottenere informazioni metriche tridimensionali di un oggetto a partire dall'analisi di fotogrammi o immagini digitali dello stesso acquisite da punti di vista (Cannarozzo *et. al*; 2012). Essa consente di definire la forma dell'oggetto fotografato e la sua collocazione spaziale fornendo le coordinate di punti in un sistema di riferimento tridimensionale.

Ciò è consentito grazie all'utilizzo di speciali camere che producono fotografie (dette fotogrammi per rimarcarne la valenza metrica) sulle quali è possibile eseguire misure di precisione.

Se nella *fotogrammetria classica analitica* il dato primario da cui partivano tutti i processi di calcolo era la fotografia, con l'avvento delle immagini digitali si è passati all'utilizzo di queste

ultime facendo nascere una nuova branca della fotogrammetria chiamata appunto "*fotogrammetria digitale*".

Tra i principali vantaggi di questa tecnica troviamo una maggiore produttività soprattutto per grandi estensioni, rapidità, economicità (grazie all'alta produttività) e uniformità di precisione (Fichera, 2016).

Il rilievo fotogrammetrico consente di rilevare oggetti senza un contatto fisico con essi rilevando simultaneamente molti punti riconducibili quindi a una gran quantità di informazioni.

Il principio base della fotogrammetria è la visione stereoscopica, ovvero la visione dell'oggetto da rappresentare da diversi punti di vista (Fichera, 2016) (Figura 13).

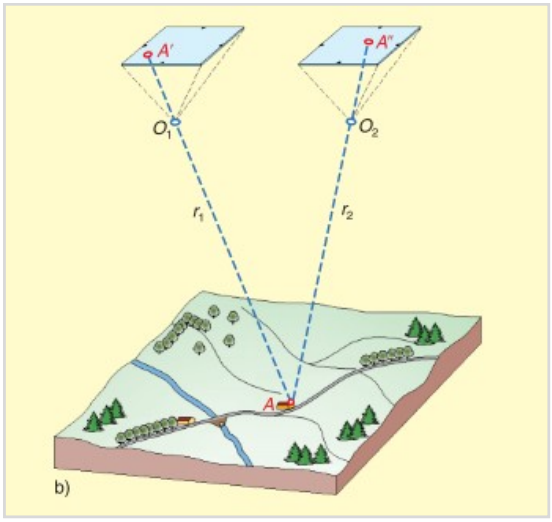


Figura 13: Visione di un oggetto da diversi centri di presa (fonte: Principi e strumenti della fotogrammetria:6)

Questa disciplina ha avuto negli anni diverse fasi temporali di sviluppo. La sua *fase pionieristica* (1851) prevedevano misure di grandezze su semplici fotogrammi tramite intersezioni in avanti, ovviamente soggette a notevoli errori di distorsione degli obiettivi fotografici.

La *Fase analogica-stereoscopica* (1900 – 1960) introduce la stereoscopia e il principio della marca mobile, che permisero di superare le difficoltà dell'ambiguo riconoscimento dei punti omologhi su due fotogrammi diversi, consentendo il tracciamento continuo di linee planimetriche e di curve di livello. Questa è l'era dei restitutori analogici e dell'introduzione della fotogrammetria aerea.

La *Fase analitica* (dal 1960 in poi) vede l'introdursi dei calcolatori elettronici quindi si ha il passaggio da una coppia stereoscopica di fotogrammi alla relativa proiezione ortogonale tramite lo sviluppo di equazioni elaborate da software.
Per ultima la *Fase digitale* (a partire dagli anni '90) dove è stato possibile produrre e utilizzare immagini non fotografiche, ma numeriche, cioè strutturate in una matrice di piccoli elementi detti pixel, in grado di essere elaborate con calcolatori specializzati (Cannarozzo *et.al*; 2012)
La fotogrammetria viene classificata in base a:

- → Tipo di presa utilizzata;
- → Tipo di elaborazione;
- → Tipo di fotografia utilizzata

Tabella 1: Classificazione della fotogrammetria

PRESA	***Fotogrammetria terrestre*** Le prese avvengono da terra a distanze inferiore a 200 m. Definita anche fotogrammetria dei vicini	***Fotogrammetria aerea*** Le prese avvengono da aereo a distanze superiori a 200m. Definita anche fotogrammetria dei lontani
ELABORAZIONE	***Fotogrammetria analogica*** La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene con dispositivi fisici che riproducono l'inverso della presa	***Fotogrammetria analitica*** La ricostruzione degli oggetti rilevati si ottiene tramite matrici
FOTOGRAFIA	***Fotogrammetria classica*** Le fotografie sono su pellicola o lastre di vetro	***Fotogrammetria digitale*** Le fotografie sono ottenute sotto forma numerica e organizzate in pixel

In ogni caso i prodotti finali ottenibili dalla fotogrammetria possono essere (Cannarozzo *et.al*; 2012):

- → Rappresentazioni grafiche, come carte topografiche o semplici disegni;
- → Rappresentazioni numeriche, ovvero coordinate di punti appartenenti agli oggetti rilevati;
- → Ulteriori immagini, come fotografie elaborate (es.ortopiani).

Risolvere un "problema fotogrammetrico" significa individuare le trasformazioni da applicare alle coordinate dello spazio immagine della fotografia in modo da relazionarlo con le grandezze dello spazio oggetto da rilevare (Smith, 2006).
La relazione da individuare (Figura 14) è quindi tra le coordinate oggetto tridimensionali (X,Y,Z) e le coordinate bidimensionali dell'immagine fotografica (x,y).

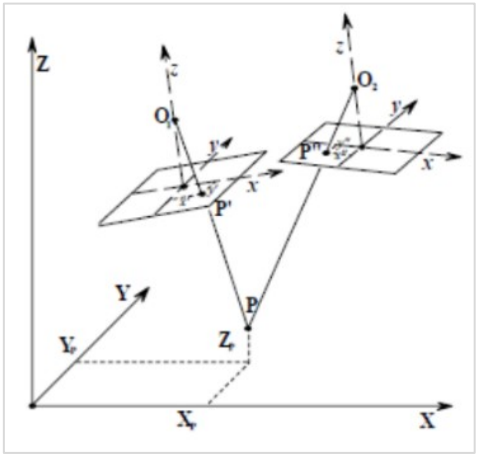


Figura 14: Relazione fra coordinate immagine (x,y) e coordinate 3D oggetto (X,Y, Z)

Le fasi principali di un processo fotogrammetrico sono:

- *Presa*: acquisizione delle immagini (fotografiche o digitali con opportune camere), dalle coordinate tridimensionali dell'oggetto (noti i parametri di orientamento interno della macchina fotografica) si ottengono le coordinate bidimensionali dell'immagine.
- *Orientamento*: operazioni preliminari per la determinazione dei parametri che consentono di posizionare i centri di presa e le lastre con la stessa posizione nello spazio che avevano al momento della presa (parametri della trasformazione da 2D a 3D).
- *Restituzione*: determinazione delle coordinate spaziali di molti punti per la ricostruzione dell'oggetto o per il tracciamento di una carta (Figura 15).

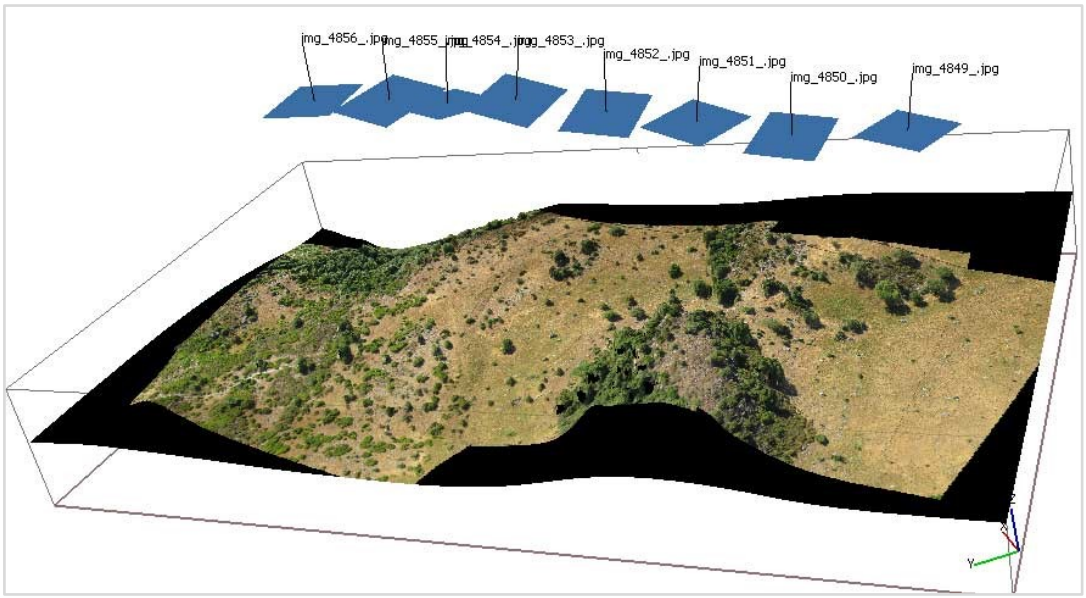


Figura 15:Rilievo fotogrammetrico. Fase di restituzione

Una tecnica comune è effettuare rilievi fotogrammetrici con Droni, noti anche come dispositivi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*).

Nel corso degli ultimi decenni sono stati realizzati droni di varie forme, dimensioni, funzionalità, e le loro applicazioni civili stanno diventando sempre più comuni, trattandosi di strumenti a basso costo e ad alta risoluzione utili a colmare le lacune di dati e integrare le capacità di aerei con equipaggio/uomo e sistemi di telerilevamento satellitare (Tang *et.al*; 2015).

L'uso dei droni nella fotogrammetria, così come nel telerilevamento, ha apportato vantaggi unici nella ricerca e nelle applicazioni forestali: dalla mappatura dei vuoti delle chiome, alla composizione e struttura delle foreste, al monitoraggio degli incendi boschivi e al supporto di una gestione intensiva delle foreste tramite le stime dei volumi legnosi (Floris *et al.*, 2012).

Con l'avvento delle camere digitali di ridotte dimensioni ma con un elevato standard qualitativo, la fotogrammetria può essere accostata agli APR (Aereomobile a Pilotaggio Remoto) e al loro utilizzo per la creazione di Modelli digitali del terreno (DTM), produzione ortofoto e allo stesso tempo per la produzione di modelli 3D.

1.2.3 *Laser Scanner*

Fra i sensori attivi, ovvero coloro che provvedono all'energia elettromagnetica necessaria per illuminare la scena d'interesse, abbiamo tutti gli strumenti basati su *tecnologia laser o laser scanning.*

La diffusione degli strumenti basati su questa tecnologia è abbastanza recente e probabilmente è una delle grandi tecnologie che troverà una forte espansione nel prossimo futuro, in quanto aumentano ogni giorno gli strumenti a disposizione, il livello di accuratezza raggiungibile e parallelamente evolvono i software per la gestione e la modellazione dei dati.

Queste nuove tecnologie offrono opportunità che si dimostrano di grande interesse soprattutto per il rilevamento nel settore dei beni culturali, "rivoluzionando" i tempi di rilievo e la successiva rappresentazione dei dati (Figura 16).

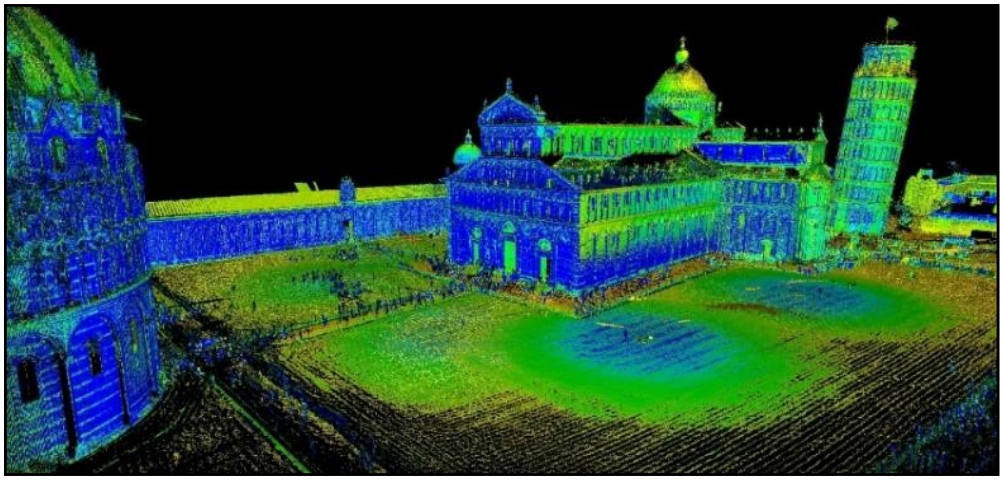


Figura 16: Esempio di rilievo architettonico con laser scanner da drone (Pisa) (Microgeo)

Non esiste una definizione universalmente riconosciuta che riguardi questi strumenti a scansione, ma possiamo dire che dal punto di vista dell'utilizzatore un laser scanner è qualunque strumento che restituisca coordinate 3D della superficie dell'oggetto (Brivio, *et al*., 2006).

La scansione laser rappresenta quindi, una significativa evoluzione di alcuni aspetti della Fotogrammetria, in quanto fornisce direttamente il modello tridimensionale di una superficie, in modo automatico, sistematico, e con un'alta velocità.

Alcune delle caratteristiche comuni di questi strumenti sono:

- Dimensioni ridotte e quindi una relativa comodità di trasporto;
- Alta velocità (centinaia o milioni di punti / secondo);

- Ampia finestra di scansione (alcuni strumenti sono in grado di realizzare una finestra di 360° in orizzontale);
- Restituzione dei risultati in tempo reale (coordinate 3D);
- Possibilità di utilizzo in posizione fissa, mobile o su aereo.

Il principio di base delle differenti tipologie di laser scanner è la proiezione di un raggio o fascio di luce sull'oggetto e l'analisi del segnale di ritorno.
Le diverse tipologie di strumentazione implicano differenze nelle accuratezze di misura della distanza, nelle modalità di acquisizione e nella risoluzione della nuvola di punti.
Allo stato attuale non esiste alcuno strumento in grado di soddisfare contemporaneamente a tutte queste esigenze (Bonacina *et al*., 2007).
Ecco perché la scelta dello strumento, per ridurre al minimo un eventuale errore, deve essere effettuata in base alle esigenze specifiche di utilizzo sulla base delle molteplici caratteristiche:

- Accuratezza;
- velocità di acquisizione;
- range di misura;
- lunghezza d'onda del segnale in base alle possibili sorgenti di rumore esterno (luce solare, umidità) e delle caratteristiche di riflettività delle superfici esterne;
- campo visivo dello strumento;
- dotazione di camere digitali interne od esterne;
- facilità di trasporto;
- tipo di alimentazione;
- qualità del software d'acquisizione.

In generale è in questa seconda fase che si differenziano i diversi principi operativi di acquisizione del sensore. Se ne distinguono due:

- Distanziometri (Figura 17)
  → *Misura del tempo di volo* (TOF): tempo che intercorre tra l'emissione del segnale e la ricezione del raggio allo strumento.
  → *Metodo della comparazione di fase*: misura la distanza tramite il TOF ovvero [(tempo di volo x velocità della luce) / 2].
- Triangolazione (Figura 18)
  → *Scanner di triangolazione*: misura delle distanze sulla base dell'intersezione in avanti (come in topografia).

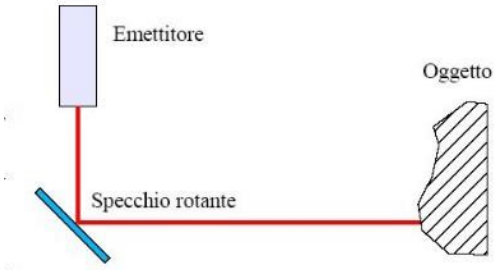


Figura 17: Laser scanner Distanziometri

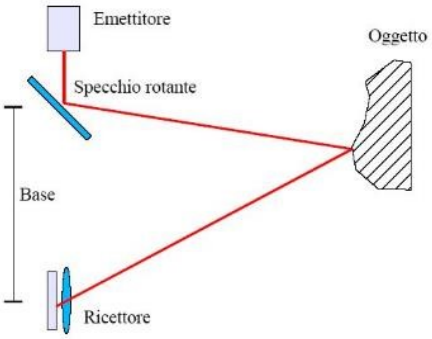


Figura 18: Laser scanner Triangolazione

Il dato diretto fornito da un sistema laser a scansione, al termine della sessione di misura, è un insieme di coordinate tridimensionali di un numero elevato di punti (tutti quelli che vengono colpiti dal raggio laser), che costituiscono la cosiddetta "nuvola di punti" (Figura 19) che descrive la superficie dell'oggetto e anche tutto ciò che compare nel campo di vista dello strumento (Brivio, *et al*., 2006).

Figura 19:Nuvola di punti rilevata con Lidar terreste in un popolamento forestale

In particolare, un metodo attivo di telerilevamento capace di misurare accuratamente le distanze trasmettendo l'energia laser e analizzando l'energia restituita è il sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging)* noto anche come Scansione Laser terrestre statica. (Figura 20) La sua crescente diffusione, alla fine degli anni '90, ha fornito nuove conoscenze per valutare la struttura forestale e la distribuzione tridimensionale delle piante arboree, a livello di

particella e su scala regionale, consentono la restituzione della struttura 3D dei soprassuoli forestali con precisione millimetrica (Bauwens *et al.*, 2016).

Il primo sistema commerciale è stato costruito da Cyra Technologies (acquisita da Leica nel 2001) nel 1998, e i primi lavori sono stati realizzati nel 1998 relativi alla stima degli attributi degli alberi negli inventari forestali (Liang *et al.*, 2016).

Essendo costituito da sensori attivi, il sistema LiDAR non ha bisogno di una sorgente esterna di energia. Questo vantaggio permette al sistema di operare in qualsiasi condizione di luminosità, anche di notte. È determinante, però, l'occlusione dovuta alla presenza di altri oggetti posti tra il sensore e l'oggetto in questione, quali nubi e aerosol (Gomarasca, 2000).

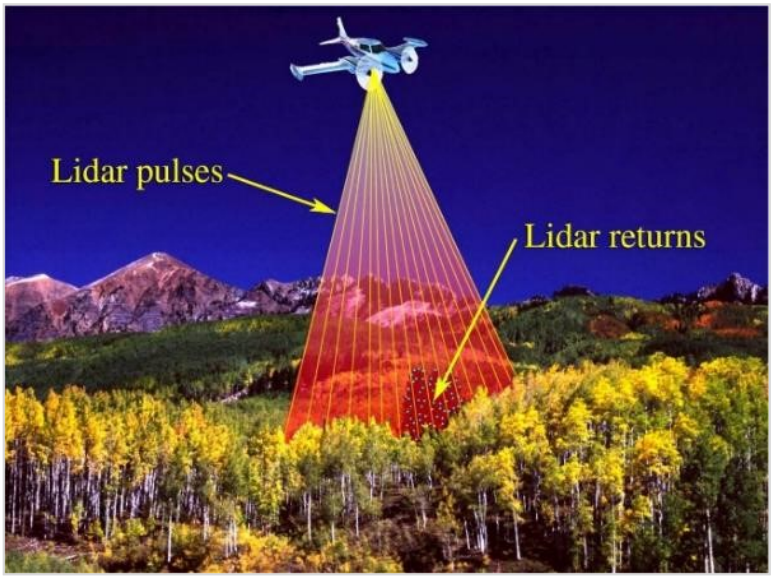


Figura 20: Funzionamento fascio di luce Lidar (ResearchGate, s.d.)

La principale motivazione per l'utilizzo di tecnologie laser negli inventari forestali è stata quella di migliorare l'efficienza del lavoro, con l'affiancamento di queste tecnologie alle normali prassi di rilievo a terra per l'acquisizione delle variabili dendrometriche. Quest'ultime sono aspetti fondamentali, sia perché sono indicative delle proprietà e dello stato evolutivo del bosco, sia perché permettono di programmare le più opportune strategie di gestione selvicolturali delle aree forestali, e prevenire il rischio incendi (Barilotti, 2010).

Inizialmente la tecnologia LiDAR aviotrasportata è stata utilizzata per l'elaborazione di Modelli Digitali del Terreno (DTM), garantendo un significativo miglioramento nel dettaglio dell'analisi topografica delle superfici terrestri, soprattutto in aree di difficile accesso o dove i metodi tradizionali non erano molto soddisfacenti.

Solo recentemente si è applicata nel settore forestale dove, risulta fondamentale analizzare la dimensione dell'impronta al suolo (*footprint*) in quanto è alla base del fenomeno di generazione dei ritorni multipli (Figura 21). Quando un raggio laser incontra un ostacolo, come la chioma di un albero, una parte del segnale viene riflessa dall'ostacolo mentre un'altra parte rimanente (non intercettata) prosegue il suo tragitto fino all'ostacolo successivo.

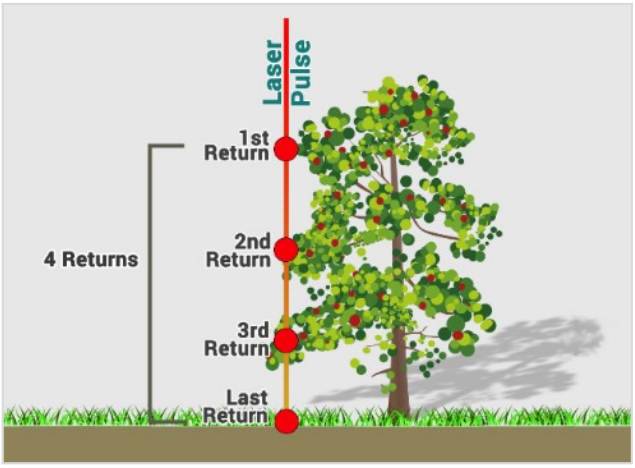


Figura 21: Numero di ritorni Lidar. ALS

Secondo il tipo di rilievo da eseguire, questi dispositivi di telerilevamento possono essere installati a terra (TLS – *Terrestrial Laser Scanner*- Figura 22) oppure montati su mezzi aviotrasportati, quali aerei, elicotteri o satelliti (ALS – *Airborne Laser Scanner o Aerial Laser Scanner* - Figura 23)

Figura 22: Terrestrial Laser Scanner (TLS)

Figura 23: Airborne Laser Scanner (ALS)

Alcuni sensori ALS recenti possono registrare le riflessioni non attraverso un numero di impulsi discreti, dando origine a modelli di forma degli oggetti colpiti cosiddetti *full-waveform* (Pirotti *et al.*, 2013).

Riassumendo, tre aspetti fondamentali intimamente interagenti modellano l'adattamento di qualsiasi nuova tecnica di misurazione e strumento in campo forestale (Liang *et al.*, 2016):

I. Il costo dell'acquisizione dei dati che deriva principalmente dall'apparecchiatura, dal tempo di acquisizione e post-elaborazione dei dati.
II. La precisione di stima delle variabili dendrometriche che dovrebbe essere allo stesso livello o superare la tecnica convenzionale.
III. La tecnica dovrebbe concentrarsi principalmente ai fini della gestione in orizzonti temporali diversi o per lo studio di un fenomeno specifico.

Un'altra caratteristica, non meno importante, è costituita dal Sistema Globale di Navigazione (GNSS) comunemente utilizzata nella maggior parte dei sistemi di scansione laser mobile (MLS) per una mappatura accurata delle foreste.
Il GNSS, insieme ad IMU (*Inertial Measurement Unit*) offrono una soluzione soddisfacente in ambienti non forestali e forestali aperti, per i quali è possibile ottenere una precisione di posizionamento molto accurata. Tuttavia, il posizionamento in una foresta matura e densa è ancora un compito impegnativo a causa della perdita di segnali dovuta alla presenza di chioma e bassa reperibilità (Tang *et al.*, 2015)(Agostino *et al.*, 2010).
La necessità di mappare e navigare contemporaneamente in uno spazio ha condotto gli studi verso nuove tecnologie.
A partire dagli anni '80 e '90, nel settore della robotica si è sviluppato la tecnologia SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping* -Figura 24) che permette di mappare un ambiente sconosciuto tramite l'utilizzo di sensori visivi (come le immagini della videocamera) o fonti di dati non visibili (come Sonar, Radar o LiDAR) e contemporaneamente determinare la posizione del sensore stesso sulla mappa utilizzando un'unità di misurazione inerziale (IMU).

Figura 24: Sistema di *proximal sensing* con tecnologia SLAM

Il principale elemento innovativo è dato dalla mobilità con cui il rilievo viene effettuato grazie ad un sistema mobile di trasporto dotato di sensoristica avanzata e processore che permette di effettuare rilievi 3D in ogni situazione e per ogni esigenza, ricostruendo nuvole di punti in tempo reale di locali indoor o outdoor.
Ci sono due strategie principali per determinare le posizioni con tecnologia SLAM (Tang *et al.*, 2015):

- *posizionamento assoluto con feature-matching*: estrae le caratteristiche da scansioni di gamma, come linee, angoli e semicerchi di tronchi d'albero, e poi abbina le caratteristiche note estratte con una mappa generata per riconoscere la posizione;
- *posizionamento relativo con scan-matching*: utilizza due o più fotogrammi consecutivi di punti di scansione per ottenere direttamente la piattaforma mobile di movimento con vari algoritmi.

L'avvento di nuovi sistemi mobili di mappatura che integrano sensori diversi ha reso più facile l'acquisizione di informazioni 3D multiple ad alta velocità.
Oggi lo sviluppo tecnologico ha permesso la realizzazione di sistemi portatili adatti ai rilievi forestali, che integrando principalmente dispositivi LiDAR, camere e piattaforme inerziali, permettono di creare in modo semplice e veloce un modello 3D a nuvola di punti completo dell'ambiente. Tuttavia, le prestazioni di questi strumenti differiscono a seconda del contesto di acquisizione (interno ed esterno), delle caratteristiche della scena (es. illuminazione, presenza di oggetti e persone, superfici riflettenti, texture) e, soprattutto, degli algoritmi di mappatura e localizzazione implementati nei dispositivi (Lehtola *et al.*, 2017).
Le tecnologie Laser scanner, rappresentano un'alternativa rapida, affidabile ed economica ai vari sistemi manuali e possono assistere i tecnici, nella caratterizzazione del disturbo nonché nell'identificazione dei possibili elementi di rischio.

1.3 **Obiettivi della Tesi**

L’obiettivo generale di questa tesi è analizzare le potenzialità di utilizzo di immagini multispettrali satellitari e nuove tecniche geomatiche di rilievo prossimale (droni/APR e tecnologia SLAM mobile) per: a) lo studio della severità di un incendio che nel 2017 ha interessato un rimboschimento di conifere della foresta demaniale delle Cesane, nella provincia di Pesaro Urbino (Marche), b) l’analisi degli indici vegetazionali post-disturbo.
Le potenzialità offerte dall’utilizzo di dati telerilevati nell’ambito del monitoraggio dei disturbi in ecosistemi forestali sono stati ampiamente riconosciuti; invece la tecnologia SLAM è in

fase di sperimentazione. Entrambe vengono considerate un'importante risorsa per il monitoraggio, la gestione e la conservazione delle risorse ambientali.

L'occorrenza di due incendi boschivi (Monti delle Cesane e San Bartolo) di dimensioni medio-grandi per la regione Marche (oltre 100 ha ciascuno) avvenuti in provincia di Pesaro nell'estate del 2017, ha fornito l'occasione di analizzarne da vicino dinamiche ed effetti diretti ed indiretti del fuoco in particolare sull'area delle Cesane.

Gli obiettivi specifici di questo studio sono:

- Mappare e classificare la severità dell'incendio boschivo analizzandone le caratteristiche in termini dimensionali e di impatto sulla vegetazione forestale attraverso l'utilizzo di indici per il rilievo dei cambiamenti spettrali in seguito ad un disturbo e l'analisi delle dinamiche di evoluzione vegetazionale;
- Testare l'utilizzo dei veivoli APR per l'elaborazione di modelli digitali del terreno e l'estrazione di ortofoto con tecniche di fotogrammetria;
- Testare l'utilizzo della tecnologia SLAM con strumentazione Kaarta Stencil-2 per la rapida stima di parametri dendrometrici utili alla definizione dei danni al soprassuolo in seguito ad un disturbo.

Capitolo 2
MATERIALI E METODI

2.1 **La foresta demaniale delle Cesane**

2.1.1 *Inquadramento geografico e geomorfologico*

I monti delle Cesane, rappresentano le diramazioni orientali, verso il Mar Adriatico, della grande dorsale Umbro-Marchigiana che insieme ai rilievi dei Monti Catria e Nerone, costituisce l'ossatura della regione Marche. Questa piccola catena montuosa è formata da una serie di rilievi, con altitudine massima di 648 m s.l.m, che si estendono per circa 20 km formando un'ampia zona di notevole rilevanza turistica e paesaggistica.

L'omonima Foresta Demaniale Regionale delle "Cesane" è interamente compresa nella provincia di Pesaro-Urbino, nei comuni di Urbino, Fossombrone, ed Isola del Piano.
Le Cesane occupano un territorio complessivo di 2.213 ettari dei quali 2044,5 ettari (92,4%) appartengono al bacino idrografico del fiume Metauro ed i restanti 169,4 ettari (7,6%) al bacino del Foglia. I suoi boschi, hanno un'estensione pari a circa 1500 ettari e costituiscono la "*Foresta demaniale delle Cesane*" (Valle del Metauro, 2006)(
Figura 25).

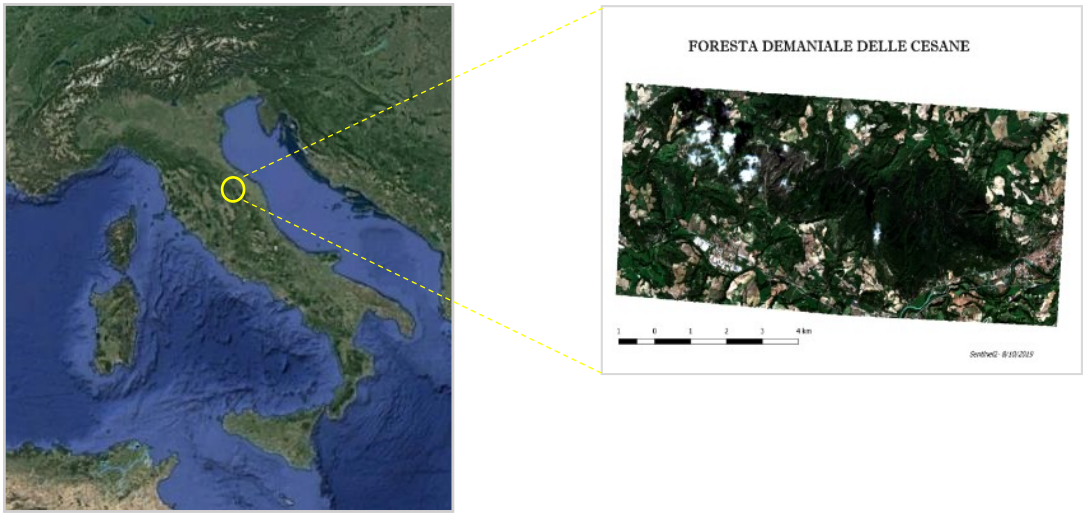


Figura 25:Italia (fonte Google Earth) a sinistra; Foresta Demaniale delle Cesane (fonte: elaborazione immagini Sentinel-2 del 8-10-2019) a destra.

La struttura geologica è caratterizzata da facciate prevalentemente calcaree e calcareo - marnose con al nucleo le parti più antiche (Scaglia Bianca e Rossa); nelle zone più prossimali, ritroviamo strutture giovani come il Bisciaro e depositi marnoso - arenacei.
Dal punto di vista geomorfologico l'area si presenta come un vasto rilievo con fianchi più o meno acclivi a seconda dei versanti e dalla cima arrotondata (o quasi appiattita) dai fenomeni erosivi
I fianchi infatti sono incisi da numerosi corsi d'acqua aventi prevalentemente carattere torrentizio, mentre a sud, sud-ovest in corrispondenza di Fossombrone, la dorsale è stata erosa dal fiume Metauro che, scavando da prima in terreni alluvionali e successivamente in terreni calcarei, ha dato vita a formazioni geomorfologiche molto tipiche chiamate *Marmitte*, dovute alla combinazione di fattori litologici e idrodinamici del corso d'acqua (Valle del Metauro, 2006).

2.1.2 *Uso del suolo*

Oggi la proprietà demaniale delle Cesane è costituita da 1483 ettari di cui la superficie non boscata è di circa 13 ettari, mentre quella boscata è di 1469 ettari, distribuita tra conifere, boschi cedui e arbusteti (Figura 26) (Provincia di Pesaro Urbino, s.d.).

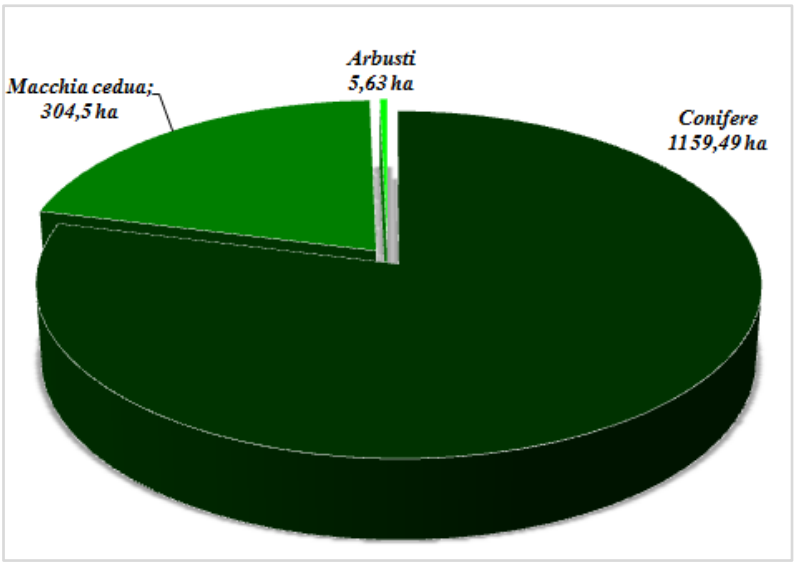


Figura 26: Distribuzione vegetazione forestale (elaborazione dati Provincia di Pesaro Urbino)

2.1.3 *Caratteri climatici*

Dal punto di vista climatico, il territorio delle Cesane può essere inserito nella fascia dei climi della regione Mediterranea interna (macroclima caldo temperato), ma per l'influenza degli

Appennini, delle correnti Balcaniche e dell'Adriatico, la zona è più fredda rispetto al versante tirrenico.

I dati dell'Osservatorio Meteorologico "Alessandro Serpieri" della stazione delle Cesane (attiva dal 1/08/2007) consentono di verificare le anomalie di temperature e precipitazioni medie rispettivamente nel 2016 e nel 2017.

Il 2017 è un anno caratteristico, caratterizzato da temperature medie mensili superiori al precedente anno (Figura 27) e da precipitazioni tendenzialmente inferiori ad eccezione del picco nel mese di settembre (Figura 28) (Brutti, 2017).

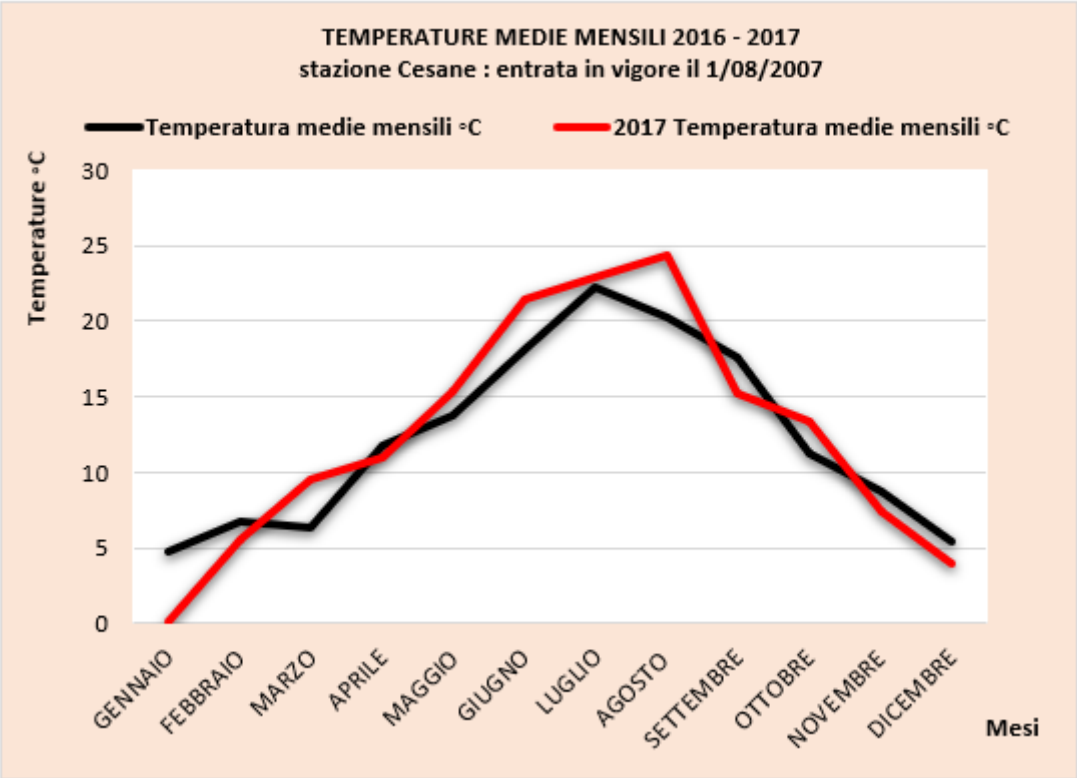


Figura 27: Andamento delle temperature medie 2016-2017 per la stazione delle Cesane. (Ossmeteo s.d.).

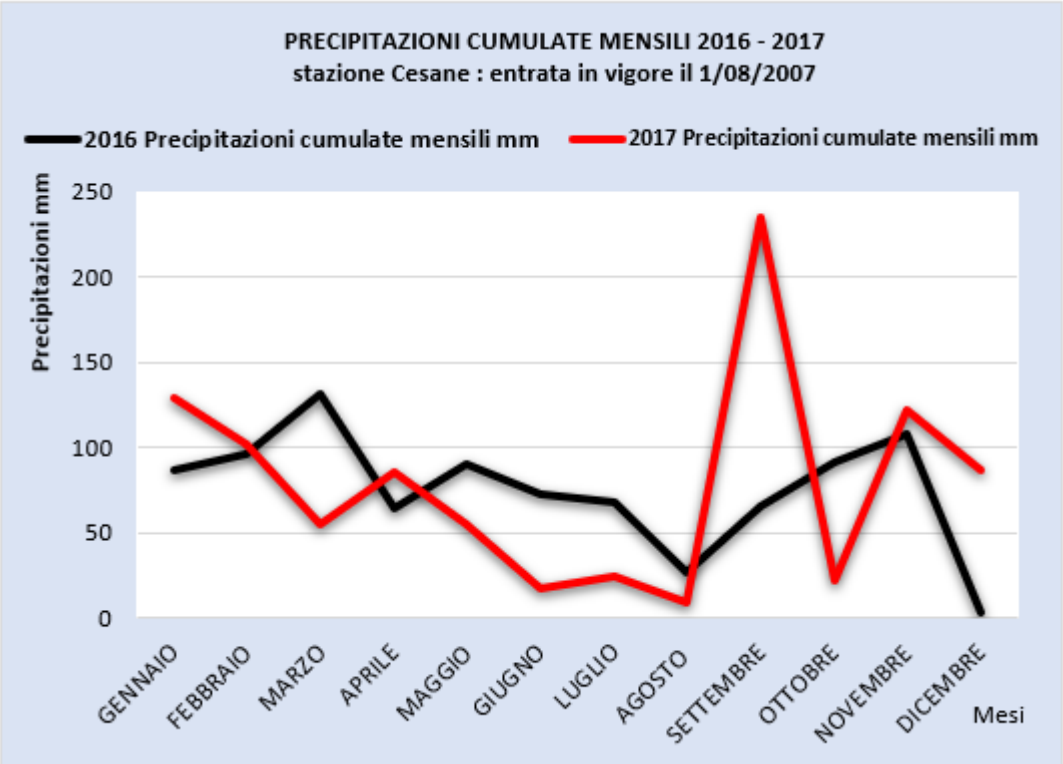


Figura 28:Andamento delle precipitazioni cumulate 2016 - 2017 per la stazione delle Cesane. (Ossmeteo s.d.).

2.2 **L'incendio forestale delle Cesane e sopralluoghi nell'area interessata**

Il 7 luglio del 2017 un incendio si è sviluppato nella Foresta demaniale delle Cesane, interessando parte del comune di Urbino e del comune di Fossombrone.

Si è trattato di un incendio di chioma, con gravi conseguenze per il soprassuolo, di origine incerta (colposa/dolosa) e sviluppatosi in un campo coltivo di erba medica e in una giornata ventosa, particolarmente siccitosa e con la vegetazione in probabile stress idrico.

Le operazioni di spegnimento, in un periodo storico particolare nel quale le competenze operative sono passate dal Corpo Forestale ai Vigili del Fuoco, sono state poco solerti per alcuni problemi logistici dei mezzi a terra e rese difficoltose dalla morfologia acclive dell'area di innesco. Ciò ha consentito un'indisturbata risalita del fuoco lungo il versante ed un rapido passaggio ai soprassuoli forestali di conifere.

L'impiego di un elicottero dei Vigili del fuoco del Comando di Bologna, dei mezzi di terra della Protezione civile e dei volontari antincendio boschivo, non sono stati sufficienti a domare l'incendio ed è stato quindi necessario l'intervento di due Canadair della flotta aerea nazionale.

DATE

1/09/2017

14/04/2018

5/07/2019

Figura 29: Area percorsa dal fuoco. a) Il repentino ricaccio vegetativo di orniello (*Fraxinus ornus*), due mesi dopo l'incendio; b) 9 mesi dopo l'incendio, inizio dello sviluppo della vegetazione erbacea; c) dopo due anni esatti

dall'incendio si osserva lo sviluppo della vegetazione erbacea e dei polloni di orniello nonchè tutti i fusti di pino nero carbonizzati.

La perimetrazione dell'incendio è stata eseguita dai Carabinieri Forestali nei giorni immediatamente successivi al fuoco tramite rilievo GNSS. (Figura 30)

Figura 30: Perimetro dell'incendio boschivo eseguito dai Carabinieri forestali riportato su immagine RGB da Sentinel-2 (data 16-10-2019).

2.3 **Analisi della severità con immagini Sentinel-2**

2.3.1 *Tipologia e scelta delle immagini satellitari*

Lo studio multitemporale della severità è stato effettuato, con l'utilizzo di immagini multispettrali della missione MSI Sentinel-2, disponibili gratuitamente ed in maniera continuativa dal primo lancio del satellite Sentinel-2A (23/06/2015). Tali dati sono ampiamente utilizzati nella gestione del territorio, controllo delle catastrofi, operazioni di soccorso umanitario, per la mappatura dei rischi e per problemi di sicurezza.

Sentinel-2 è una missione europea sviluppata dall'ESA nell'ambito del programma Copernicus, di immagini ad alta risoluzione composta da due satelliti gemelli, Sentinel-2A e Sentinel-2B (lancio 7/03/2017), che volano sulla stessa orbita eliosincrona a 786 km di altezza sfalsati di 180°.

I due satelliti hanno le seguenti caratteristiche:

- Utilizzano strumenti ottici che campionano lo spettro elettromagnetico in 13 bande;

- Sorvolano lo stesso punto della superficie terrestre con lo stesso angolo di visuale ogni 5 giorni;
- Hanno una risoluzione di dettaglio al suolo di 10, 20, 60 metri a seconda della banda investigata;
- Sono dati accessibili e gratuiti.

Tabella 2: bande spettrali sentinel-2 (elaborazione dati fonte: http://www.gisagmaps.com/landsat-8-sentinel-2-bands/)

	Sentinel-2 bande	**Risoluzione (m)**	**Lunghezza d'onda µm**
1	Aerosol	60	0.421-0.457
2	Blu	10	0.439-0.535
3	Verde	10	0.537-0.582
4	Rosso	10	0.646-0.685
5	Red-Edge	20	0.694-0.714
6	Red-Edge	20	0.731-0.749
7	Red-Edge	20	0.768-0.796
8	NIR	10	0.757-0.908
8a	Red-Edge	20	0.848-0.881
10	Vapore acqueo	60	0.931-0.958
11	SWIR – cirri	60	1.338-1.414
12	SWIR-1	20	1.539-1.681
13	SWIR-2	20	2.072-2.312

I satelliti gemelli forniscono continuità ai dati immagine di tipo SPOT e LANDSAT e l'archivio da cui è possibile scaricare le immagini è Copernicus (https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home)

I prodotti Sentinel-2 disponibili per gli utenti sono elencati nella Tabella ***3***.

Tabella 3: Tipologia di prodotti Sentinel-2 (elaborazione dati fonte:Esa)

PRODOTTO	**descrizione**
Level-1C	• Tessere da 100x100 km² • TOA (Top Of Atmosphere)

Level-2A	• Tessere da 100x100 km² • Derivano dai prodotti 1C ma forniscono immagini di riflettanza BOA (Botton OF Atmosphere) • Generati da marzo 2018

Per valutare la severità dell'incendio nell'area di studio, è stata analizzata una coppia di immagini multispettrali: un'acquisizione prima dell'incendio e l'altra subito dopo il disturbo. Le immagini multispettrali selezionate e preprocessate sono mostrate in Tabella 4.

Tabella 4: Immagini Sentinel-2 utilizzate per il rilievo dell'area incendiata

Data acquisizione	***Sensore***	***Archivio***	***Livello di pre-processamento***
13/06/2017	Sentinel -2A	ESA	Livello 2° - BOA (immagini ortogonali in proiezione UTM e sistema di riferimento WGS84)
23/07/2017	Sentinel -2A	ESA	

2.3.2 *Calcolo dell'indice Normalized Burn Ratio con dati Sentinel-2*

I dati satellitari multispettrali sono stati utilizzati per valutare la severità dell'incendio boschivo grazie all'indice spettrale *Normalize Burn Ratio (NBR)*. I parametri che influenzano i risultati ottenibili con l'indice *NBR* sono influenzati dal livello di attività fotosintetica delle piante e dal contenuto di acqua nei tessuti vegetali e nel suolo.

L'indice viene calcolato con la seguente formula:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \quad [1]$$

NBR può assumere valori che variano da -1 a +1 dove i valori negativi corrispondono ad aree incendiate, le quali si distinguono dalle superfici non vegetate come suolo nudo e rocce in valore assoluto. La variazione di riflettanza rilevata dal sensore remoto nella banda dell'infrarosso vicino (*Near Infrared* – NIR) e nella banda dell'infrarosso ad onda corta (*Shortwave Infrared* – SWIR) prima e dopo il passaggio di un incendio, è maggiore rispetto a quella rilevata in altre. Come risultato dell'uso di queste due bande, l'NBR è particolarmente sensibile alle variazioni nella quantità di vegetazione viva, al contenuto di umidità e ad alcune

condizioni del suolo che possono verificarsi dopo l'incendio (Miller and Thode, 2007) (Figura 31).

Nello specifico, con l'utilizzo delle bande fornite dalle immagini multispettrali Sentinel-2, l'NBR è stato così calcolato:

$$NBR\ Sentinel_2 = \frac{B8-B12}{B8+B12} \quad [2]$$

In particolare, la banda dello SWIR2, prima di essere utilizzata per il calcolo dell'indice, è stata ri-campionata con una risoluzione al suolo di 10 metri.

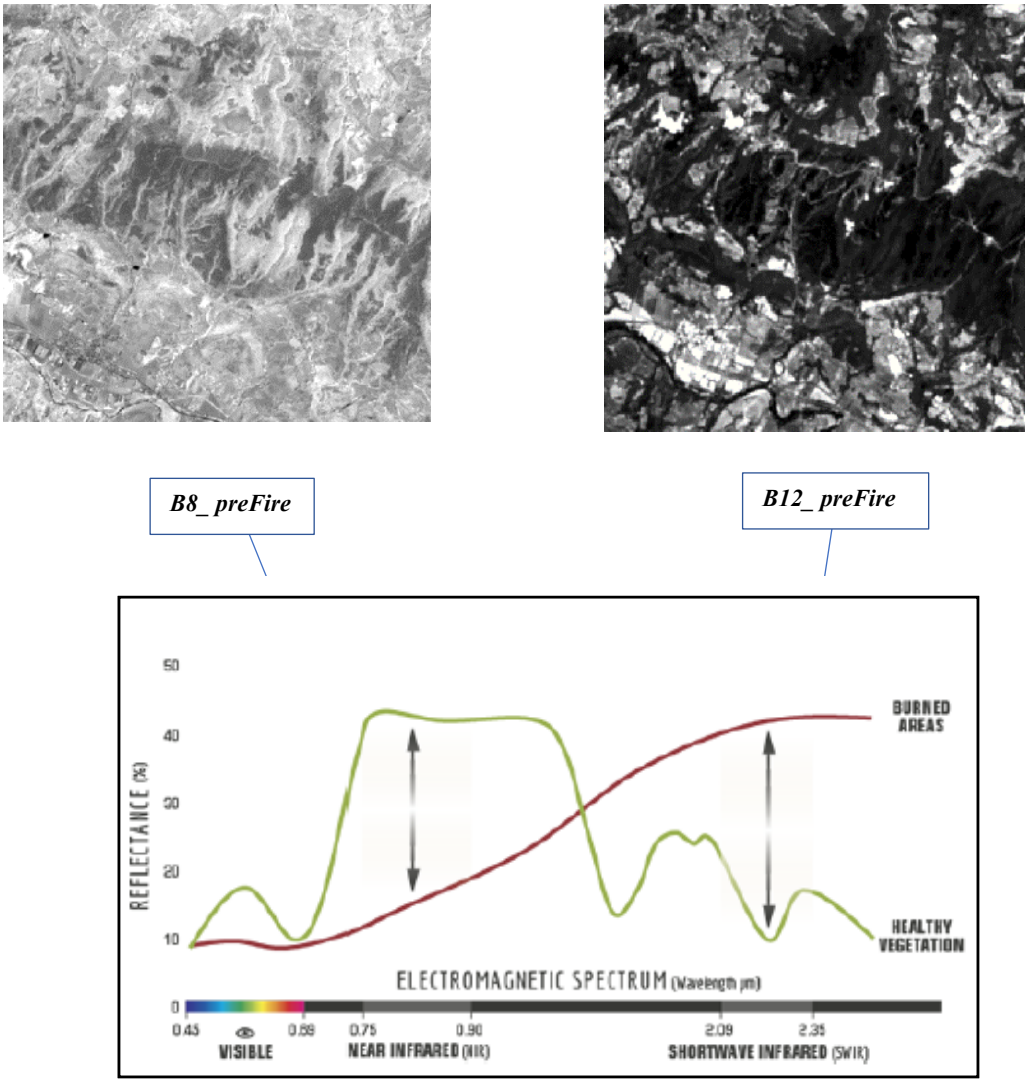
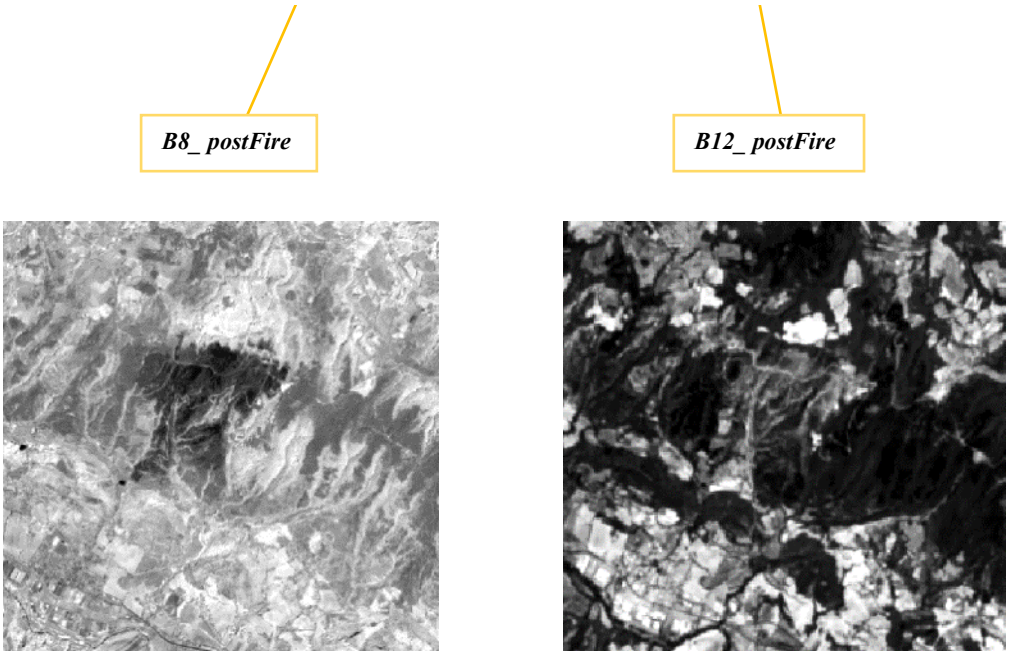


Figura 31: Confronto della risposta spettrale della vegetazione a diverse lunghezze d'onda tra un'area con copertura vegetale fotosintetizzante e un'area colpita da incendio.



2.3.3 *Calcolo dell'indice Delta Normalized Burn Ratio (dNBR)*

Per caratterizzare le aree percorse dal fuoco e fornire una variazione quantitativa del cambiamento, si esegue una differenza multitemporale dei valori NBR pre e post-incendio. Questa variazione, misurata in *delta NBR* (dNBR) ampiamente utilizzato, è direttamente proporzionale alla severità dell'incendio (Roy *et.al*; 2006).
Il dNBR è stato così calcolato:

$$dNBR \quad = \Big(\big(NBR_{pre\ incendio} - NBR_{post\ incendio} \big) * 1000 \Big) - dNBR_{offset} \qquad [3]$$

dNBR misura il cambiamento ambientale causato dall'incendio: valori positivi elevati indicano un'alta severità dell'incendio, valori intorno allo 0 superfici incombuste e valori negativi molto elevati una ottima capacità di ricrescita della vegetazione nel sito (Key and Benson, 2005).
A differenza delle immagini Landsat, le immagini Sentinel-2 hanno valori di riflettanza al suolo semplici, motivo per cui il dNBR è stato scalato $*10^3$, raggiungendo la scala canonica di interpretazione e di utilizzo del dato con numeri interi, come consigliato in letteratura per seguire la convenzione stabilita da Key e Benson 2005.
Il valore del $dNBR_{offset}$ invece, viene utilizzato per la calibrazione dell'indice stesso, attraverso la stima delle differenze nello stadio fenologico e nel contenuto di acqua della vegetazione presenti nelle due immagini acquisite in anni differenti (Key 2006; Miller & Thode 2006).
Tale coefficiente corrisponde alla media dei valori ottenuti dal calcolo iniziale del dNBR, in aree di controllo esterne al perimetro dell'incendio, caratterizzate dalla presenza delle medesime categorie forestali esistenti nell'area incendiata.
Per la definizione di tali aree è stata utilizzata la Carta dei tipi forestali delle Marche.
In questo modo sono state individuate due aree di controllo, una per ciascuna categoria forestale principale; successivamente è stato ricavato il valore medio di dNBR tra le categorie forestali, corrispondente al valore di scostamento tra le due immagini (Tabella 5).

Tabella 5: Categorie forestali per la calibrazione del dNBR

Categoria forestale	dNBR medio complessivo
- *Rimboschimenti di conifere* - *Querceti*	***6.908***

Tale valore viene sottratto a quello di dNBR per la calibrazione dell'indice stesso, tenendo conto dell'assetto vegetazionale di quell'area prima dell'incendio.
Questo passaggio evidenzia la possibilità di sottostima della severità in aree scarsamente vegetate, caratterizzate da bassi valori di NBR pre – incendio (Figura 32) (Miller and Thode, 2007).

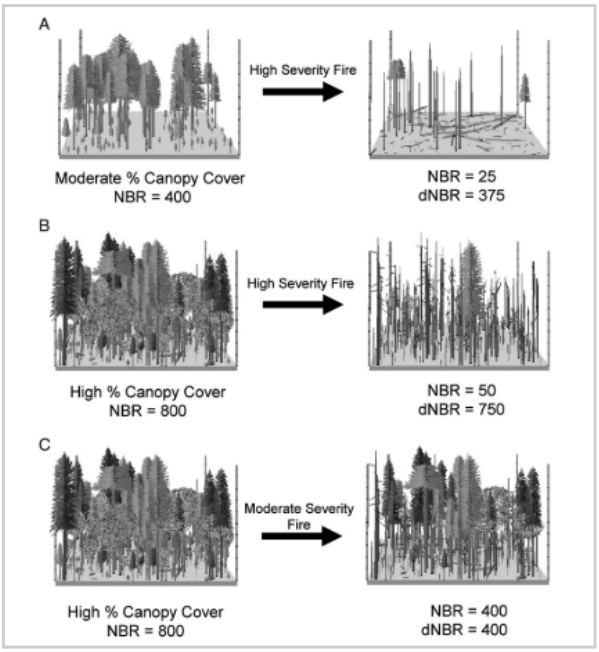


Figura 32: Effetto della copertura forestale prima dell'incendio sull'indice di severità dNBR. Il valore di NBR pari ad 800 corrisponde ad una elevata copertura delle chiome, mentre un valore di 25 è indicativo di scarsa o assente copertura vegetale (fonte: Miller & Thode 2007).

L'indice dNBR fornisce quindi valori di severità assoluta, a differenza di RBR (*Relative Burn Ratio*) [3] che consente una classificazione più accurata delle classi di severità in siti che presentano una copertura forestale eterogenea (Miller and Thode, 2007), risultando un indice indispensabile per confrontare tra loro differenti aree percorse da incendio boschivo.
RBR viene calcolato con la seguente formula generale:

$$RBR = \frac{dNBR}{\sqrt{|\,\text{NBR pre}\,|}} \quad [4]$$

Le procedure necessarie alla classificazione di severità nell'area percorsa da incendio boschivo sono descritte in Figura 33.

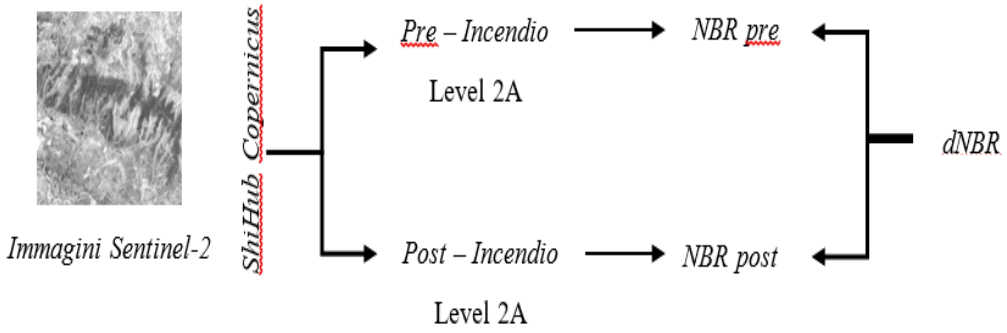


Figura 33: Workflow utilizzato per la produzione della carta di severità di incendio attraverso il calcolo dell'indice dNBR

L'utilizzo di un indice relativo garantisce una maggiore accuratezza di classificazione dei pixel nelle diverse classi di severità in condizioni di copertura vegetale estremamente variabili.
In questo studio è stato utilizzato il dNBR, in quanto RBR non ha un'importanza essenziale trattandosi di un'unica area in esame con copertura forestale semplificata (piano dominante monospecifico).

2.3.4 *Perimetrazione incendio boschivo*

La determinazione del perimetro dell'area incendiata è stata eseguita con una classificazione semi-automatica basata sulla segmentazione automatica delle immagini (approccio *object oriented*), utilizzando il software *eCognition Developer 64 8.9.* e classificazione manuale da parte di operatore esperto.
Il software consente di realizzare il processo di segmentazione mediante la messa a punto di fattori di scala, forma e colore, i quali concorrono alla definizione dei poligoni che sono successivamente classificati manualmente (Figura 34).
La segmentazione di un'immagine è il processo di partizione della stessa in regioni significative e viene comunemente utilizzata per ottenere una rappresentazione più compatta, per estrarre degli oggetti o come strumento per l'analisi delle immagini digitali.
La segmentazione, il primo passo dell'approccio object-oriented, consiste nella fusione di pixel in gruppi chiamati "oggetti" o "segmenti". In confronto ai pixel , gli oggetti contengono

molte più informazioni e sono caratterizzati da molti attributi come la tessitura, la vicinanza con altri oggetti, il contesto, oltre alle informazioni spettrali (Sysdeco, 2007). Questa tecnologia implica che, l'informazione necessaria per interpretare un'immagine non si trova nei singoli pixel, ma in oggetti significativi dell'immagine. Le immagini sono state segmentate con fattore di scala fisso = 30 e con indici di colore, pari a 0.5.

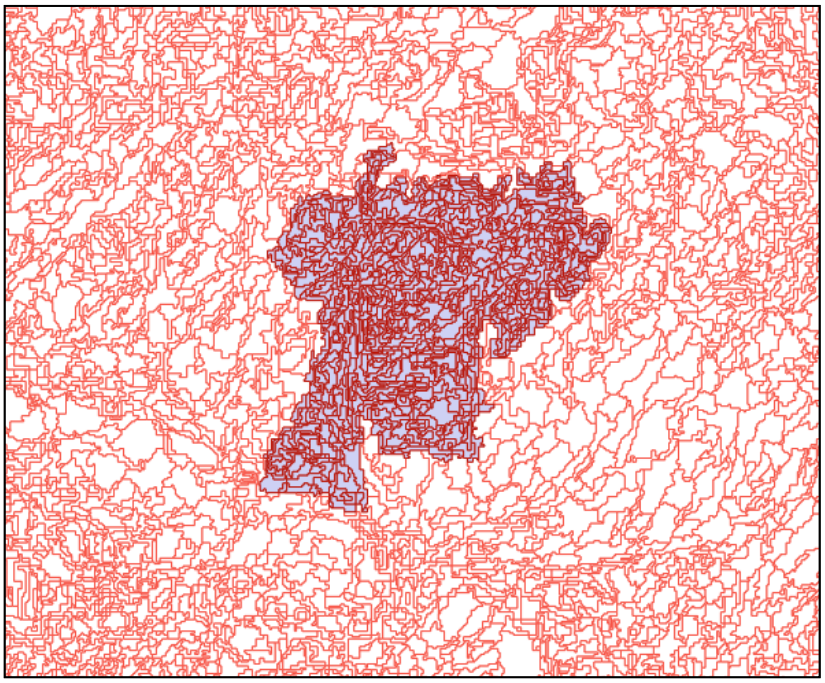


Figura 34: Poligoni risultati dalla segmentatazione con software *eCognition*; in evidenza l'area d'incendio classificata manualmente (fonte:elaborazione dati Qgis)

2.3.5 *Classificazione della severità dell'incendio*

La categorizzazione dell'immagine in soglie di gravità in falsi colori è stata effettuata seguendo la tabella proposta da Key and Benson, (2005) (Figura 35).

Severity Level	dNBR Range (scaled by 10^3)	dNBR Range (not scaled)
Enhanced Regrowth, high (post-fire)	-500 to -251	-0.500 to -0.251
Enhanced Regrowth, low (post-fire)	-250 to -101	-0.250 to -0.101
Unburned	-100 to +99	-0.100 to +0.99
Low Severity	+100 to +269	+0.100 to +0.269
Moderate-low Severity	+270 to +439	+0.270 to +0.439
Miderate-high Severity	+440 to +659	+0.440 to +0.659
High Severity	+660 to +1300	+0.660 to +1.300

Figura 35: Classi di severità *sensu* Key and Benson, 2005

Successivamente è stata effettuata su sistema GIS l'intersezione tra la "Carta della severità" e la "Carta delle tipologie forestali". Questa operazione ci ha permesso di quantificare la severità all'interno delle diverse categorie forestali presenti.

2.4 **Analisi del recupero vegetazionale post – incendio**

La comprensione delle dinamiche di rigenerazione vegetazionale post-incendio è un aspetto importante per valutare la resilienza delle foreste e per indirizzare adeguatamente la eventuali interventi gestionali post-disturbo (Morresi *et al.*, 2019).

L'analisi delle dinamiche di recupero vegetazionale è stata effettuata con immagini Sentinel-2, acquisite prima e fino a due anni dopo l'incendio.

Le immagini sono state ricercate in finestre temporali relative alle quattro stagioni, distinte indicativamente tra febbraio, maggio, luglio ed ottobre (Tabella 6).
La scelta di utilizzare alcune immagini al di fuori della finestra temporale considerata è dovuta principalmente alla consistente copertura nuvolosa in alcune di queste.

Tabella 6: Elenco delle immagini utilizzate per l'analisi delle dinamiche di rinnovazione post-incendio

Data di acquisizione		***Sensore***	***Livello di processamento***
2019	*16 ottobre*	Satellite Sentinel – 2a Archivio ESA	Livello 2° - BOA Botton Of Atmosphere (immagini ortogonali in proiezione UTM e sistema di riferimento WGS84)
	23 luglio		
	16 aprile		
	23 febbraio		
2018	*31 ottobre*		
	20 luglio		
	31 maggio		
	29 gennaio		
2017	*18 ottobre*		
	23 luglio		
	*31 maggio**		

2.4.1 *Indici di vegetazione*

La diffusione delle tecnologie satellitari ha incentivato lo sviluppo di indici di vegetazione per il controllo delle dinamiche di rinnovazione post-incendio.

Sono numerosi gli indici utilizzabili per analizzare le diverse caratteristiche della vegetazione, fornendo un reale supporto alle analisi di campo.

Gli indici impiegati in questo studio sono i seguenti (fra parentesi le bande utilizzabili con piattaforma Sentinel-2)

- $NDVI = \frac{NIR\ (8) - RED(4)}{NIR\ (8) + RED(4)}$ [5]

- $NDMI = \frac{NIR\ (8) - SWIR1\ (11)}{NIR\ (8) + SWIR1(11)}$ [6]

- $NBR = \frac{NIR\ (8) - SWIR2\ (12)}{NIR\ (8) + SWIR2\ (12)}$ [7]

- $NBR2 = \frac{SWIR1\ (11) - SWIR2\ (12)}{SWIR1\ (11) + SWIR2\ (12)}$ [8]

La vegetazione assorbe la radiazione solare in diverse bande, ossia in diversi intervalli di frequenza e lunghezze d'onda, e ne riemette una percentuale differente in esse.
Quasi tutti gli indici sopra citati, si basano sulla differenza normalizzata della banda del NIR, sensibile alla quantità di biomassa vegetale fotosinteticamente attiva e le bande del rosso (*Red*) o dell'infrarosso ad onda corta (SWIR), la cui risposta varia in base allo stato di salute della pianta e allo stress idrico.

2.4.1.1 NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*

L'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) è sicuramente l'indice di vegetazione più noto ed utilizzato in quanto meglio rappresenta il livello di vigoria delle piante e il loro stato di salute. E' ampiamente applicato nella ricerca sui cambiamenti climatici e ambientali e risulta molto utile per analizzare la variazione inter-annuale della copertura vegetale e la sua risposta alle condizioni ambientali esterne (Figura 36)(Jiang *et al.*, 2006).

NDVI si calcola come rapporto tra la differenza e la somma delle radiazioni emesse acquisite nella banda del vicino infrarosso (0,7 μm - 1,2 μm) e in quella del rosso (0,63 μm - 0,69 μm) [5].

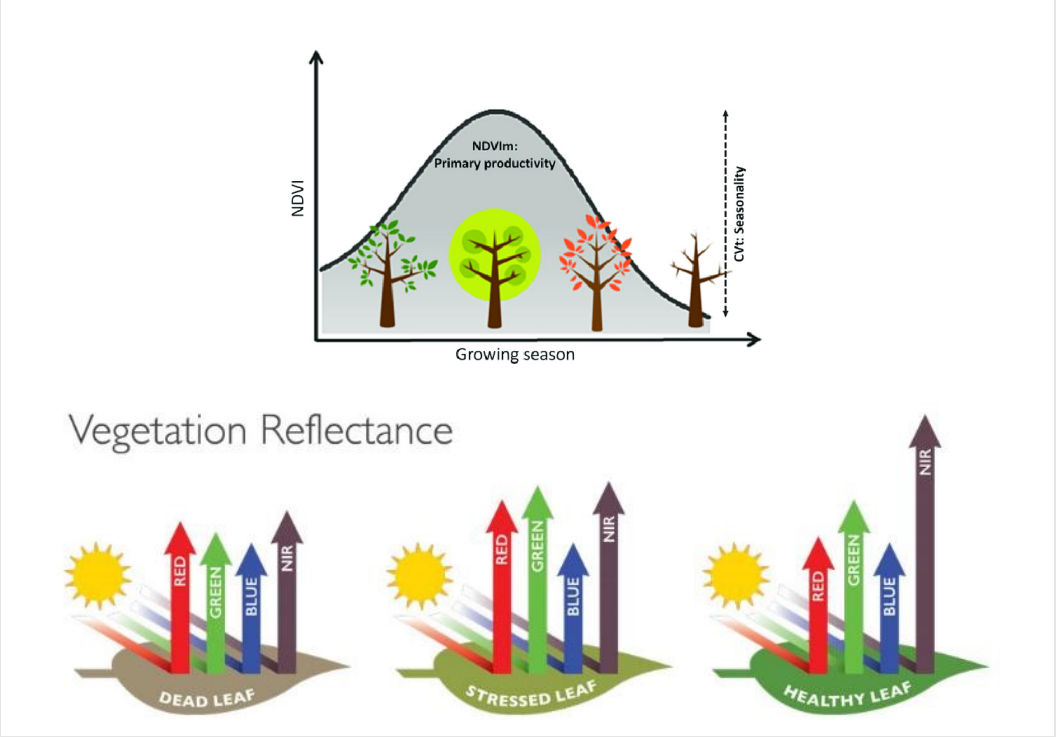


Figura 36: Variazione di NDVI durante la Growing Season (sopra); risposta spettrale della vegetazione in base allo stato di salute (sotto) (Agricolus, s.d.)

NDVI consente di distinguere con semplicità aree vegetate da altri tipi di superficie, ma allo stesso tempo, è anche sensibile ad una serie di fattori perturbanti come quelli atmosferici, la presenza di nuvole, la risposta spettrale del suolo, introducendo una variabilità svincolata dal comportamento spettrale della vegetazione (Piao *et al.*, 2003).

I valori di NDVI variano con l'assorbimento della luce rossa da parte della clorofilla vegetale e la riflessione della radiazione infrarossa da parte delle cellule fogliari piene d'acqua. Le bande sono espresse in termini di lunghezze d'onda, nell'ordine di 1 µm (Gandhi *et al.*, 2015). Queste riflettanze spettrali sono esse stesse rapporti della radiazione riflessa su quella entrante e di conseguenza assumono valori compresi tra 0 e 1. In base alla definizione, lo stesso NDVI varia quindi da -1 a +1.

Valori negativi di NDVI (vicini -1) corrispondono all'acqua. Valori prossimi allo zero (da -0,1 a 0,1) corrispondono generalmente a zone aride con roccia, sabbia o neve. Infine, valori positivi e bassi rappresentano arbusti e pascoli (circa tra 0,2 e 0,4), mentre i valori alti indicano copertura forestale (valori intorno 1).

2.4.1.2 *NDMI: Normalized Difference Moisture Index*

L'indice della differenza normalizzata di umidità (NDMI – *Normalized Difference Moisture Index*) viene generalmente utilizzato per monitorare i livelli di combustibile in aree a rischio di incendio in base al loro contenuto idrico.

NDMI si basa sulla riflettanza della banda SWIR1 (SWIR = *Short Wave Infra-Red*, infrarosso ad onda corta), la cui variabilità rispecchia i cambiamenti del contenuto d'acqua della vegetazione e della struttura fogliare, e della banda del NIR, influenzata invece, dalla struttura interna delle foglie e dal loro contenuto di sostanza secca.

La combinazione di queste due bande migliora l'accuratezza del dato del contenuto idrico vegetazionale, in quanto la riflettanza dell'infrarosso ad onda corta è correlata negativamente al contenuto idrico delle foglie.

La differenza tra le bande NIR e SWIR1 è utile per evidenziare il contenuto di acqua nei tessuti vegetali. In tal senso la riflettanza di una foglia secca nella banda SWIR1 è all'in circa uguale alla riflettanza misurata per la banda NIR, ne consegue che la differenza tra le due bande in una foglia viva dovrebbe equivalere all'assorbimento di radiazione elettromagnetica causato dal contenuto di acqua nella foglia (Hunt. *et al* 1987).

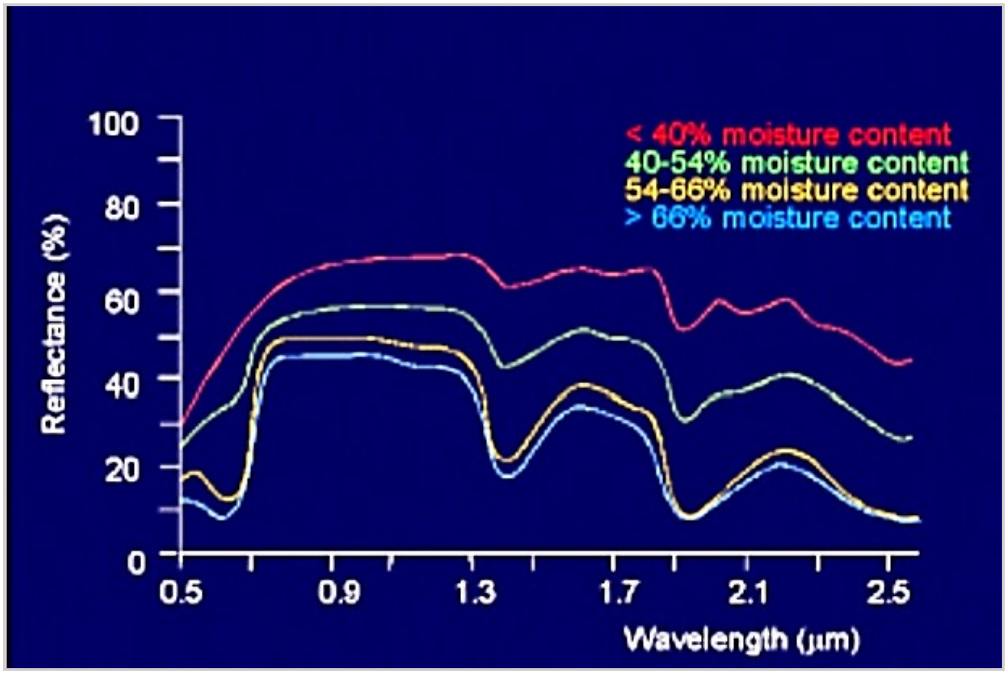


Figura 37: Variazione risposta spettrale in caso di stress idrico con un innalzamento generale dei valori di radiazione riflessa (Institute for remote sensing of environmente, s.d.)

2.4.1.3 *NBR e NBR2: Normalized Burn Ratios*

Come indicato nel paragrafo precedente, NBR è un indice ampiamente utilizzato per la classificazione della severità degli incendi in quanto è particolarmente sensibile al cambiamento del contenuto d'acqua all'interno dei tessuti vegetali e nel terreno, nonché alla presenza di copertura vegetale grazie all'utilizzo della banda del NIR.

NBR che esprime il rapporto tra SWIR2 (2,08-2,35 μm) e NIR, è stato sviluppato (Key e Benson 2005) per identificare le aree bruciate a seguito di incendio e fornire una misura quantitativa della gravità del disturbo.

NBR2, invece, è una differenza normalizzata che sfrutta il contrasto tra le due bande dello SWIR (1 e 2) per mettere in evidenza il recupero vegetazionale in tempi medio-lunghi. (Hislop *et al.*, 2018;Morresi *et al.*, 2019).

2.4.2 *Costruzione delle curve degli indici spettrali di vegetazione (Spectral Vegetation Indices - SVI)*

L'analisi delle curve degli indici di vegetazione, per ciascuna immagine Sentinel-2 è stata precedentemente illustrata.

Per comodità di analisi, ad ogni data è stato assegnato un numero progressivo ripetuto in tutti gli indici: NDVI, NDMI, NBR, NBR2.

Il calcolo degli indici è stato eseguito anche su una zona esterna al perimetro dell'incendio, per avere un riferimento sulle condizioni della vegetazione non percorsa dal fuoco.

I dati sono stati infine esportati in formato foglio di calcolo ed utilizzati per la costruzione delle curve spettrali degli indici di vegetazione nel corso del tempo, al fine di analizzare le dinamiche di recupero vegetazionale post-incendio.

2.5 **Rilievo fotogrammetrico post-incendio con APR per ricostruzione DTM**

I dispositivi APR permettono, di accedere ad aree difficilmente raggiungibili, impervie o addirittura inaccessibili, procurando allo stesso tempo, immagini dettagliate in modo veloce rispetto ai metodi tradizionali e a prezzi sempre più contenuti.

Il rilievo in questione si è svolto il 14 aprile 2018, circa 9 mesi dopo il passaggio del fuoco, su una superficie di circa 35 ettari, concentrati nella zona di maggior severità d'incendio (Figura 38).

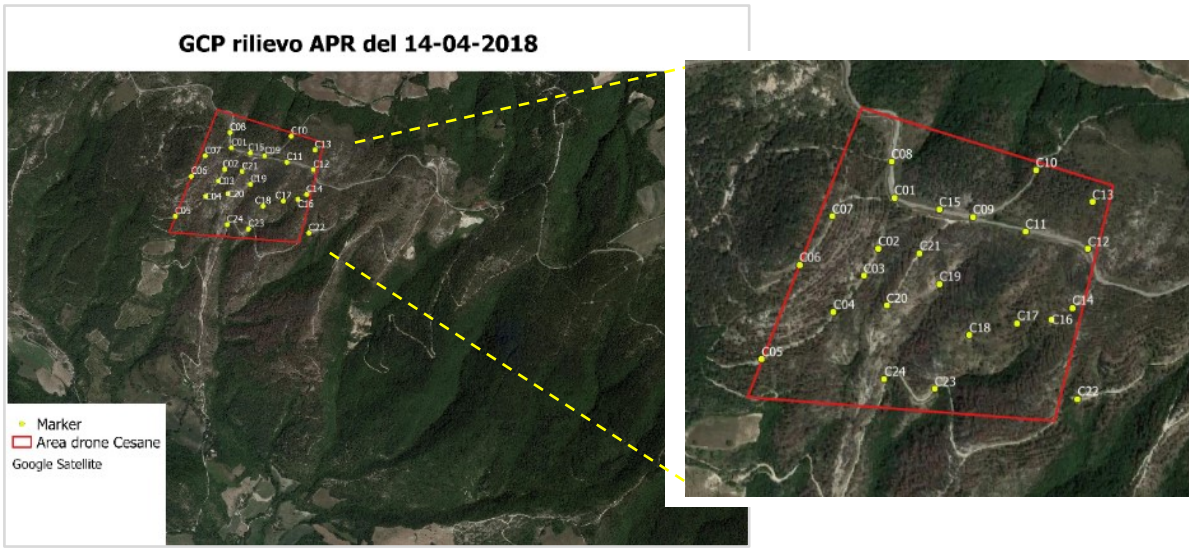


Figura 38: Rilievo fotogrammetrico e posizione dei marker al suolo del-14-04-2018 sull'area incendiata della foresta demaniale delle Cesane

Il volo è stato eseguito da operatore certificato con drone SAPR mod. FLYNOVEX N serie FLN105. La sovrapposizione longitudinale dei fotogrammi è risultata pari al 60% dell'abbracciamento al suolo del singolo fotogramma, mentre quella laterale il 30% circa.
Le riprese sono state svolte nelle ore di illuminazione privilegiata andando a minimizzare le ombre e le dominanti di colore.
Sono stati utilizzati dei marker artificiali per l'individuazione dei *Ground Control Point* (GCP). I GCP non sono altro che dei punti di coordinate note e la loro distribuzione è di fondamentale importanza in quanto determinano il risultato finale delle operazioni di ortorettifica e georeferenziazione dell'immagine (Cannarozzo, *et al* 2012)
Nel nostro caso, abbiamo posizionato a terra dei target artificiali cercando di garantire una loro distribuzione più omogenea in considerazione della quota altitudinale, di zone d'ombra, dei punti caratteristici dell'area etc.
È importante considerare che un GCP visibile soltanto da due foto scattate sarà poco influente per effettuare l'ortorettifica (Cannarozzo, *et al* 2012).
Contemporaneamente al posizionamento dei marker, si è proceduto alla rilevazione delle coordinate GPS di ciascuno di essi tramite GNSS con accuratezza centimetrica.

2.5.1 *Elaborazione dati*

I software utilizzati per la ricostruzione fotogrammetrica sono in grado di fornire informazioni metriche tridimensionali, partendo dall'elaborazione di più fotografie scattate da

punti di vista differenti e dalla conoscenza dei GCP come riferimento, in modo da ricrearne la dimensione, la posizione e l'orientamento.

I software utilizzati sono stati: *3DF Zephyr* (3DFlow) e *Agisoft Photoscan* (Agisoft LLC). Il *workflow* generale (valido per entrambi i software utilizzati) seguito per le diverse elaborazioni dei dati rilevati da drone è illustrato in Figura 39.

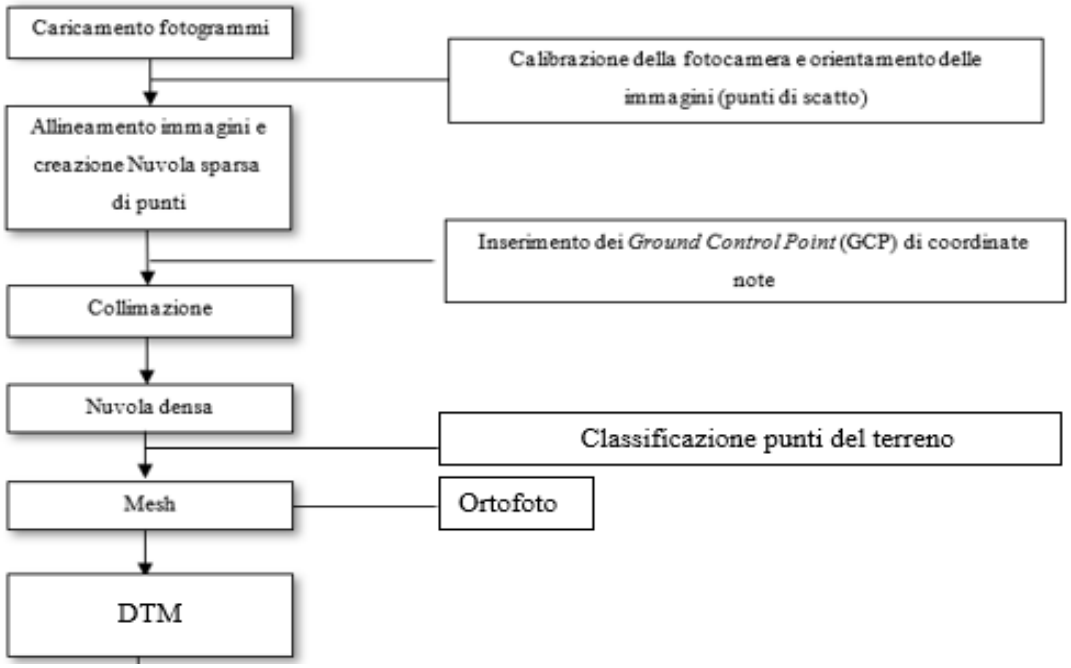


Figura 39: Workflow delle procedure seguite per l'elaborazione dei dati rilevati da drone nell'area delle Cesane.

Sono stati utilizzati *3DF Zephyr-Aerial Education 4.5313* per la pre-elaborazione iniziale, e *Agisoft Photoscan* per una più accurata elaborazione e classificazione dei punti del terreno per la generazione finale del DTM.

Una volta caricate le immagini, e inseriti i cosiddetti punti di scatto (o vincoli sulle posizioni delle fotocamere) si esegue l'orientamento dei fotogrammi. Questa operazione permette di importare le posizioni della fotocamera al momento degli scatti (attraverso il caricamento di un file di testo) e di utilizzarle successivamente per vincolare la ricostruzione tridimensionale. Una volta terminato il passaggio dedicato alla calibrazione, la prima fase di ricostruzione 3D prevede l'orientamento delle immagini e definisce una prima restituzione della scena fotografata definita *nuvola di punti sparsa* (Figura 40).

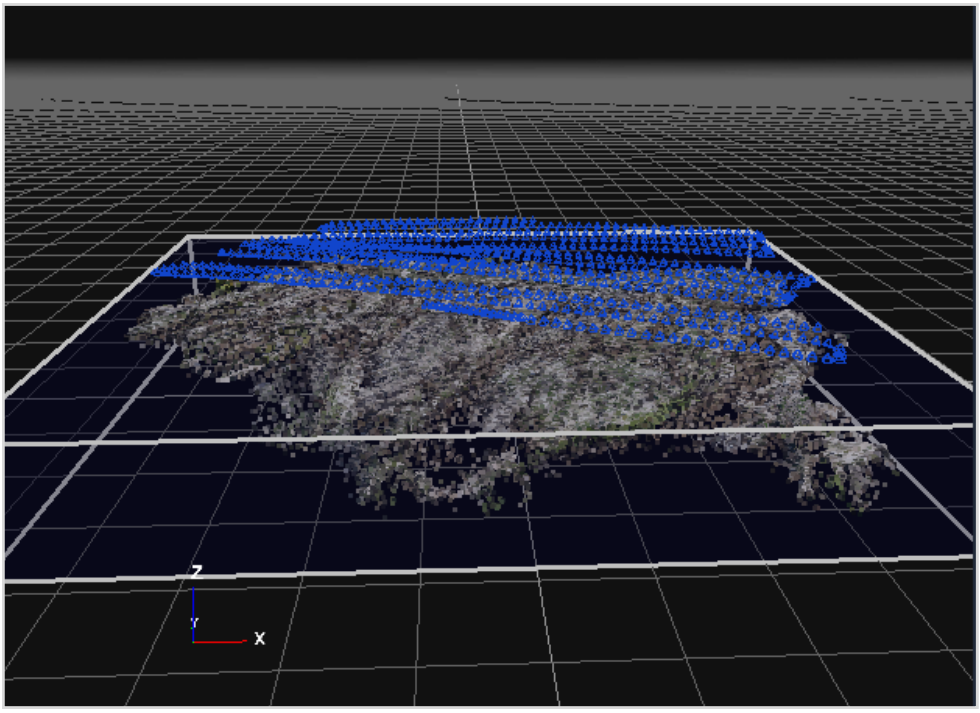


Figura 40: Nuvola di punti sparsa dell'area di studio visualizzata con 3DF Zephyr.

Un passaggio saliente, nella ricostruzione del modello è l'inserimento dei GCP (o Punti di controllo) all'interno dei singoli fotogrammi.
La prima operazione quindi, è stata caricare il file testo contenete le coordinate GPS dei singoli GCP, e seguire la selezione di ciascuno di essi attraverso l'analisi delle immagini (Figura 41).

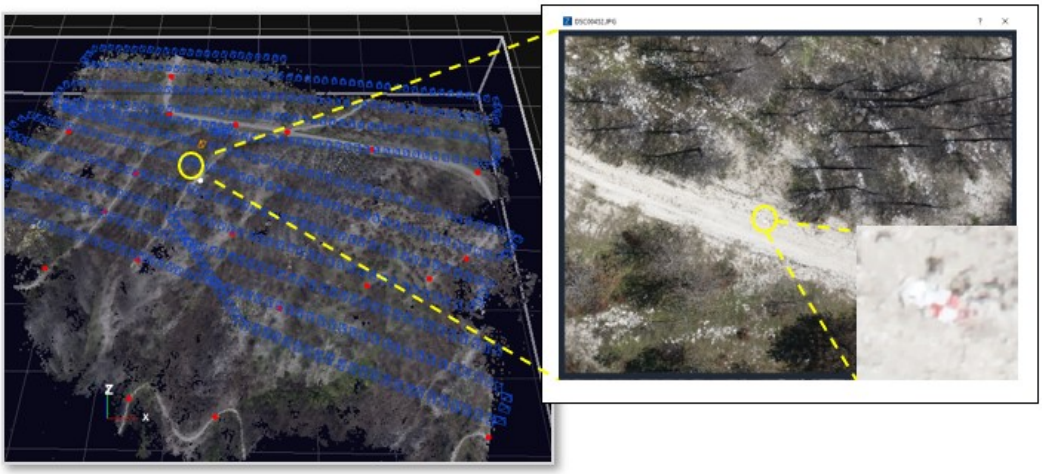


Figura 41: GCP su nuvola densa (a sinistra); Target specifico DSC00453 (a destra)

Una volta elaborata la nuvola densa, dopo aver eseguito l'allineamento dei fotogrammi con i vincoli 3D dei punti di controllo, è stato possibile generare la *Mesh* ovvero creare una superficie a partire da una nuvola di punti, i quali sono uniti a formare dei triangoli, che costituiranno la struttura base della *mesh* stessa (a seguire sarà semplificata riducendo il numero di triangoli poiché è un file molto pesante) (Figura 42).

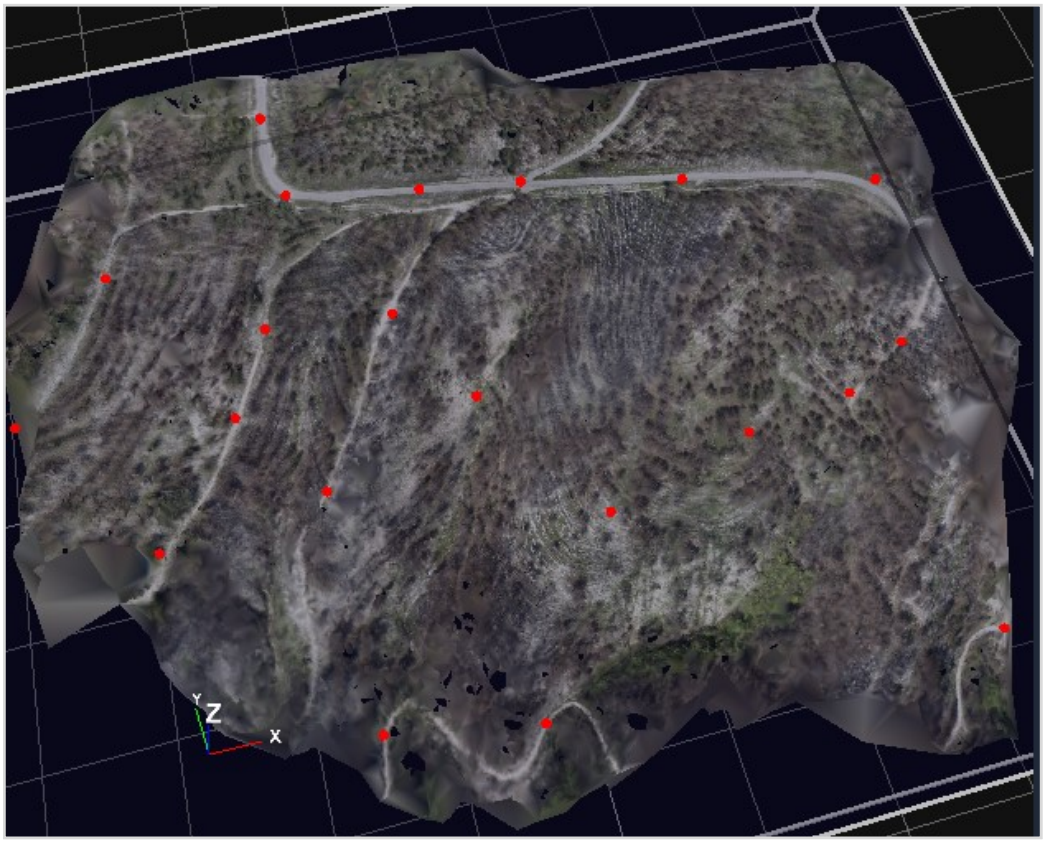


Figura 42:Mesh dell'area di studio realizzata con 3D Zephyr.

La costruzione del DTM è stata essenziale per ricavare le quote medie delle categorie forestali interessate dall'incendio.

2.6 **Rilievo prossimale post-disturbo con tecnologia SLAM per la stima dendrometrica del soprassuolo interessato**

2.6.1 *Rilievo in campo con strumentazione Kaarta Stencil 2 e volo APR*

Il sistema di mappatura *Kaarta Stencil 2* è un laser scanner mobile di dimensioni limitate, in grado di generare nuvole di punti in tempo reale con un campo di acquisizione di circa 100 metri.

La tecnologia Kaarta è stata integrata con un sensore LiDAR 3D ed una IMU per generare mappe in tempo reale senza l'utilizzo di un GPS.

In generale, questo strumento ha lo scopo di superare il problema di localizzazione attraverso il metodo analitico di mappatura simultanea che permette contemporaneamente di stimare la posizione dello strumento secondo un sistema di riferimento interno e generare un'immagine digitale della scena rilevata (Bronzino *et al.*, 2019).

La frequenza di scansione dello strumento utilizzata per l'acquisizione dei dati è di 10 Hz, con FoV di 360° e FoV verticale di 30° utilizzando 16 linee di scansione con inclinazione rispetto all'orizzontale compreso tra ±15° e ±15°.

Al termine della fase di acquisizione infatti, la nuvola di punti, la traiettoria, le immagini acquisite e i dati sono memorizzati direttamente nel computer di campo. Tuttavia, i dati grezzi e le immagini, per affinare il risultato, devono essere rielaborati in ufficio, al fine di ottimizzare la soluzione, vale a dire la generazione di mappe 3D e la stima della traiettoria effettuata.

Il rilievo in campo in questione ha avuto luogo il 5/07/2019, in particolare coinvolgeva una piccola area colpita da maggior severità.

Una volta individuata l'area in questione, si è proceduto al rilievo con Kaarta Stencil 2.

Lo stato di avanzamento della scansione è stato monitorato in tempo reale tramite un monitor esterno collegato con un cavo USB (Figura 43) al computer di campo.

Parameters	Default value [m]
voxelSize	0.4
cornerVoxelSize	0.2
surfVoxelSize	0.4
surroundVoxelSize	0.6
blindRadius	2.0

Figura 43: Strumento Kaarta Stencil 2 (a sinistra); monitor di visualizzazione con parametri di default (a destra)

A seguire, è stato effettuato un volo con drone, con relativo posizionamento dei target per GCP (Figura 44) utilizzato poi nel post-processamento per la georeferenziazione della nuvola di punti generata dal Kaarta vista l'indisponibilità di marker catarifrangenti.

Figura 44: Punti di controllo per rilievo con APR per la georeferenziazione della nuvola estratta con Stencil (fonte:elaborazione dati QGIS 3.4)

La determinazione delle coordinate di ogni punto è stata effettuata con metodo di posizionamento differenziale RTK (*Real Time Kinematic*) che prevede l'utilizzo di due ricevitori in contemporanea per migliorare l'accuratezza dei dati di posizione derivanti da sistemi di posizionamento satellitari.

RTK sfrutta misurazioni sulla fase della portante del segnale, piuttosto che il contenuto informativo del segnale, e si basa su una singola stazione di riferimento o su una stazione virtuale interpolata, per fornire correzioni in tempo reale, arrivando a fornire correzioni con accuratezza centimetrica (Unipi, 2016).

Nel caso in questione, il sistema RTK utilizzato era costituito da un ricevitore detto stazione *Base*, fermo su un punto con assenza di copertura arborea e quindi con migliori coordinate rilevabili, che invia all'altro ricevitore mobile (utilizzato sotto copertura/semi-copertura forestale), detto *Rover* la correzione RTCM per mezzo di una coppia di radio modem (distanze < 1-2 km, e a vista) oppure mediante un telefono o modem GSM (sistema Base-Rover) (Umbria Geo, 2013) (Figura 45).

Figura 45: a) RTK. Base (a destra); Rover con target (a sinistra); b) Drone DJI Spark

Il rilievo fotogrammetrico dell'area, utile alla georeferenziazione della nuvola SLAM è stato eseguito attraverso un drone *DJI Spark.*

Il piccolo UAV è dotato di protezioni elica più kit di alleggerimento (non necessario in quanto operavamo in ambito boschivo) con un peso al decollo di 340g.

Il DJI Spark è un drone compatto con sensore 1/2.3" (5.6x) da12 megapixels, la gamma di sensibilità, inclusa estensione, è 100 - 1600 ISO.

Il volo effettuato in data 5-07-2019 considerando una distanza di circa 25-30 m dal suolo, con velocità costante ed acquisendo le immagini con proiezione nadirale ovvero con l'asse ottico dell'apparecchio fotografico il più possibile verticale.
È stato essenziale valutare attentamente sia il tempo di volo che il numero globale di scatti necessari per coprire tutta la superficie indagata, garantendo un'ottima sovrapposizione dei fotogrammi e copertura della nuvola di punti Kaarta.
Il tempo medio impiegato per l'acquisizione dei dati UAV è stato di circa 30 minuti per l'intera area.

2.6.2 *Elaborazione dati da tecnologia SLAM e APR*

2.6.2.1 *Tecnologia SLAM*

Al termine della fase di acquisizione con KAARTA Stencil 2 tutte le informazioni come le impostazioni di configurazione, la nuvola di punti 3D, le traiettorie stimate sono state memorizzate in una cartella creata automaticamente dall'elaboratore laser scanner mobile.

Dal rilievo in campo con il Kaarta Stencil 2 abbiamo ottenuto una nuvola di caratterizzati dalla specifica posizione in un sistema di coordinate interno e da altri valori come intensità del raggio laser di ritorno, tempo di acquisizione etc.

La *point cloud* è fondamentale per la rappresentazione tridimensionale della superficie rilevata e, allo stesso tempo, per l'analisi delle principali variabili dendrometriche come diametri ed altezze.

Per l'elaborazione del dato Kaarta è stato utilizzato un ulteriore software di elaborazione nuvole di punti 3D: *Cloud Compare 2.10.2* Quest'ultimo è open source e può essere scaricato online ed offre numerosi servizi e strumenti di base per la modifica e il *rendering* manuale delle nuvole di punti ma anche di mesh con algoritmi di elaborazione avanzata.
Partendo dalla nuvola di punti originaria, si può notare che lo strumento ha perso l'orientamento rispetto al suo sistema interno in alcuni momenti specifici. Questi episodi sono dovuti molto probabilmente a sbalzi di movimento dell'operatore causati dai terrazzamenti poco visibili in quanto ricoperti dalla vegetazione erbacea, che hanno portato a spostamenti rigidi istantanei dello strumento e quindi ad un calcolo errato della traiettoria (Figura 46).

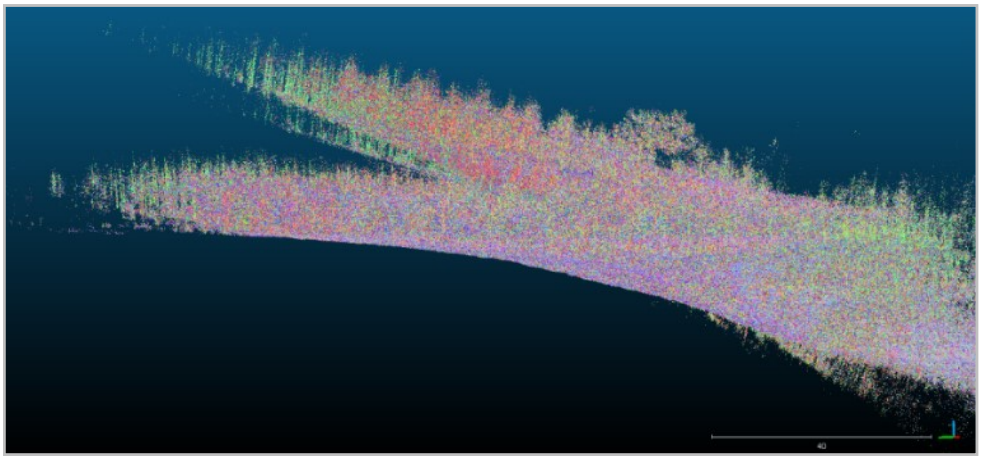


Figura 46: Dettaglio della nuvola di punti originaria con perdita di orientamento con Agisoft Photoscan

Inizialmente si pensava che, i successivi estratti non opportunamente orientati, si potessero ugualmente utilizzare sovrapponendoli e/o allineandoli alla prima parte correttamente orientata. Questa opzione, dopo alcune prove con diversi algoritmi e funzioni del software, è stata scartata in quanto le sovrapposizioni tra i diversi estratti di nuvola non erano ottimali e conducevano a distorsioni elevate.

Come confermato dalla letteratura ogni punto ha 3 componenti: spazio (rispetto ad un sistema orientato sul suo punto iniziale della traiettoria), l'intensità di riflessione e il tempo (il "punto 0" coincide con l'avvio della scansione). Si è deciso quindi di effettuare le successive elaborazioni utilizzando esclusivamente il primo estratto, ovvero quello correttamente orientato coincidente con il "punto 0" della scansione e con "z" sulla verticale.

L'elaborazione della nuvola dati Kaarta è stata eseguita nelle seguenti fasi:

Georeferenziazione

Nel paragrafo precedente è stato illustrato il processo di post-elaborazione dati del rilievo da drone fatto preventivamente all'elaborazione dei dati SLAM, per permettere di lavorare con una nuvola georiferita attribuendo ai nostri punti l'informazione relativa alla dislocazione geografica espressa in WGS84 UTM33N. Infatti, non essendo i target misurati con il GNSS ben visibili dalla nuvola del Kaarta, la sua georeferenziazione è avvenuta tramite sovrapposizione con la nuvola del drone, individuando 4 coppie di punti equivalenti. La matrice di trasformazione risultante da questa operazione è stata poi applicata anche alla traiettoria per georiferirla.

Classificazione dei punti a terra

La classificazione dei punti in Ground e Offground è un passaggio essenziale per generare modelli digitali di terreno (DTM) dai dati LiDAR (Figura 47).
Abbiamo utilizzato il CSF Filter (plugin di Cloud Compare) ovvero un algoritmo di filtraggio che si basa sulla simulazione di un semplice processo fisico: un pezzo di stoffa posizionato sopra un terreno, aderisce alla superficie, e la forma finale del tessuto è il DSM (modello di superficie digitale). Tuttavia, se il terreno viene inizialmente capovolto e il tessuto è definito con rigidità, la forma finale del tessuto è il DTM. Per simulare questo processo fisico, impieghiamo una tecnica chiamata simulazione del tessuto (Weil, 1986).
In questa fase è stato possibile esportare anche la mesh rappresentante il terreno e con la funzione "*Rasterize*" salvare il DTM usando i soli punti "*ground*".

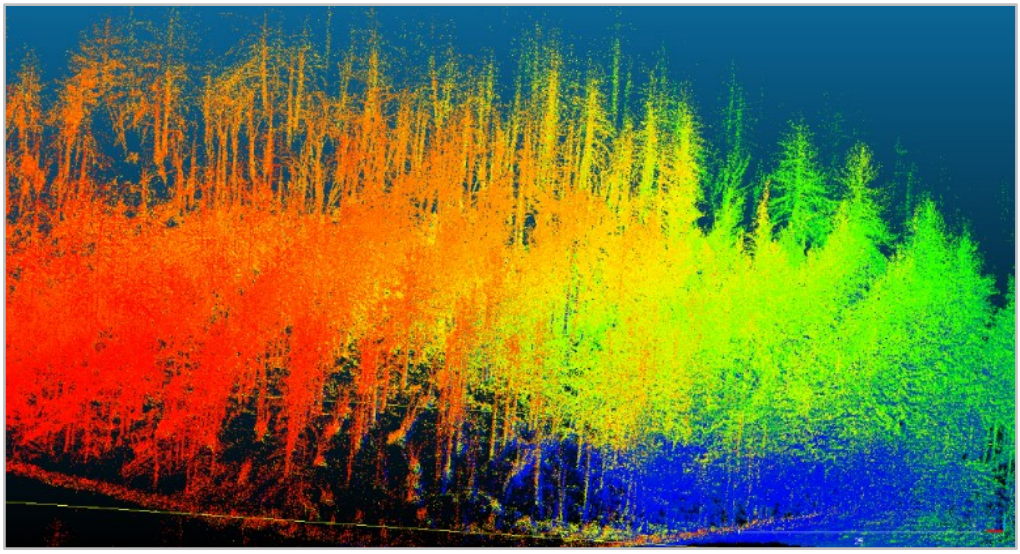


Figura 47: Immagine *Off Ground Point* dell'area campione ottenuta con Cloud Compare

Sezione a 1,25/1,35m

Con la funzione *Cloud to Mesh Distances* è stato possibile calcolare la distanza dei singoli punti dalla *mesh*, per poterli poi tematizzare ed estrarre in base alla quota che ci occorreva.
Nel nostro caso, non avendo un terreno perfettamente pianeggiante, il range scelto pari a 1.25-1.35 m è stato considerato per una buona stima dei diametri a 1.30m di altezza. Le altezze estratte non corrispondono alla vera quota verticale del punto rispetto alla base della pianta, ma alla distanza minima dalla *mesh* che risulta inclinata (Figura 48). Ciò risulta poco influente sulla stima finale dei parametri dendrometrici.

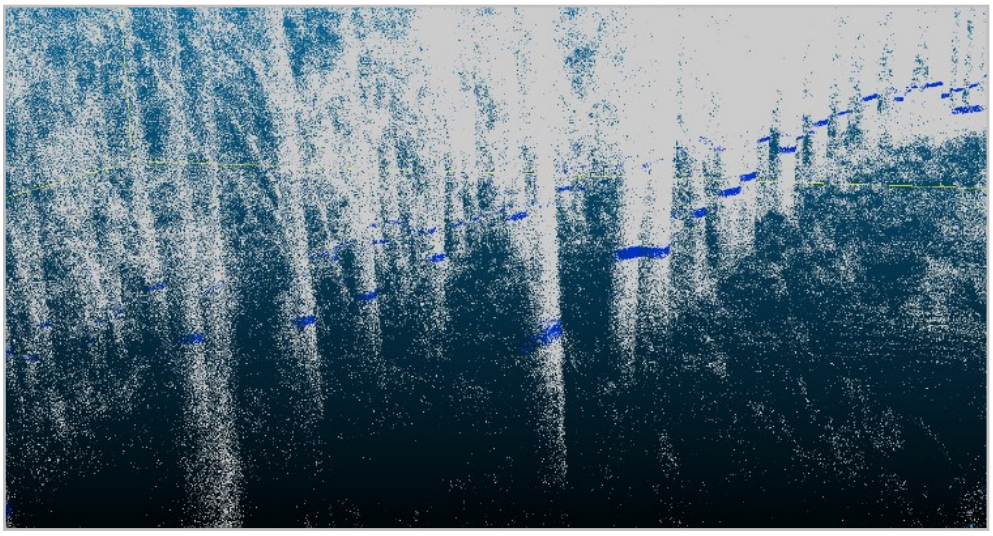


Figura 48: Nuvola di punti elaborata con Cloud Compare rilievo SLAM: in blu la sezione 1.25-1.35 m di altezza utile per estrarre il dato diametrico per ogni fusto.

2.6.2.2 *Rilievo con APR*

Il primo sostanziale passo da eseguire è stato georiferire il rilievo da drone con i marker a terra, seguendo il medesimo workflow descritto nel capitolo 2, paragrafo 2.5.1 ma utilizzando il solo software: *Agisoft Photoscan*

Quest'ultimo ha consentito l'allineamento di tutte le 341 foto scattate da drone tramite l'importazione dei parametri di orientamento esterni delle fotocamere (quelli interni sono stati calcolati dal software nella fase di allineamento e poi di ottimizzazione delle camere) utilizzati come informazioni iniziali nella elaborazione del modello 3D.

Le immagini sono state automaticamente allineate dal software ricercando i punti in comune, in quanto contenevano già le coordinate GPS approssimative nel file immagine (meno precise dei punti a terra con sistema RTK), determinando così l'orientamento di ogni foto (calcolo delle posizioni e rotazioni delle immagini: 6 parametri) e costruendo il modello con una nuvola sparsa di punti (Figura 49).

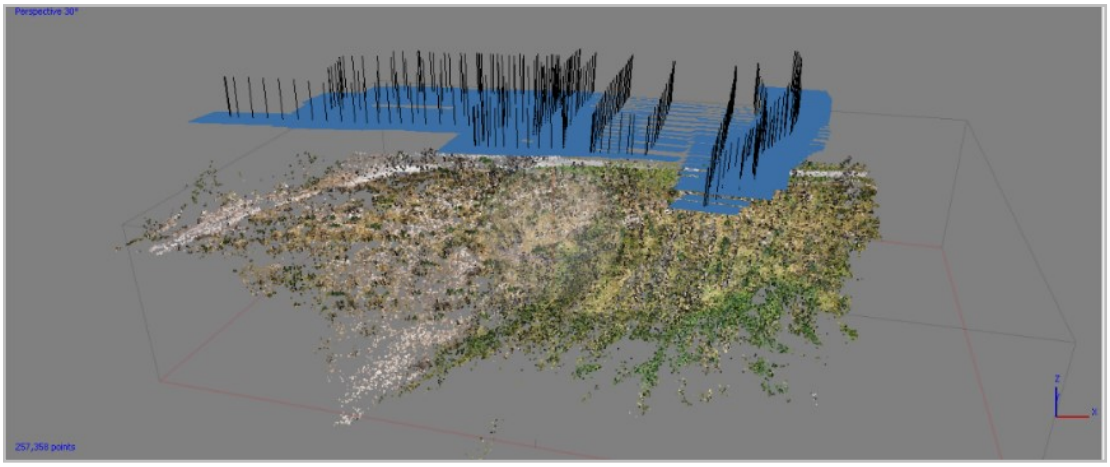


Figura 49: Nuvola di punti sparsa estratta da rilievo con DJI Spark (fonte: nostra elaborazione con dati Agisoft Photoscan)

Il livello di precisione delle stime finali dipende da molti fattori, come la sovrapposizione tra le foto in successione, nonché dalla forma della superficie dell'oggetto. Questi errori possono portare a deformazioni non lineari del modello finale (Agisoft Photoscan, 2011).
Durante la georeferenziazione il modello è trasformato linearmente utilizzando 7 parametri affini di trasformazione: (3 parametri per la traslazione, 3 per la rotazione e 1 per il ridimensionamento). Tale trasformazione può compensare solo il disallineamento lineare del modello. La componente non lineare non può essere rimossa con questo approccio. Tutto ciò solitamente è la causa principale degli errori di georeferenziazione (Agisoft Photoscan, 2011).
Per georeferenziare il modello è necessario importare la lista dei marker con le loro coordinate ed effettuare la collimazione ovvero il posizionamento dei singoli target nelle foto.
Di solito la collimazione è fatta dopo l'allineamento, perché l'identificazione del target in immagini già orientate relativamente ha alcuni vantaggi in PhotoScan.
Una volta posizionato un marker nella prima immagine, il software è in grado di suggerire, tramite una linea tratteggiata bianco-rossa la retta sulla quale dovrebbe trovarsi nella seconda immagine. Dopo aver collimato i target anche nella seconda immagine, delle bandiere grigie indicheranno la sua posizione approssimativa in tutte le immagini che lo inquadrano, che sarà a quel punto, solamente da correggere e/o confermare con un semplice trascinamento.
Inoltre, una volta che sono stati inseriti almeno 3 target, ognuno in almeno due fotogrammi, e dopo aver aggiornato il sistema di coordinate del modello, Photoscan ci suggerisce allo stesso modo la posizione approssimativa di tutti i target nelle immagini da correggere e/o confermare; questo semplifica enormemente il lavoro.

Abbiamo perciò provveduto a rifinire manualmente la posizione dei target in tutte le immagini per vincolare al meglio il dataset, senza confermare la posizione dei target in tutte quelle immagini nelle quali non fossero ben visibili, per non introdurre degli errori nel modello (Figura 50).

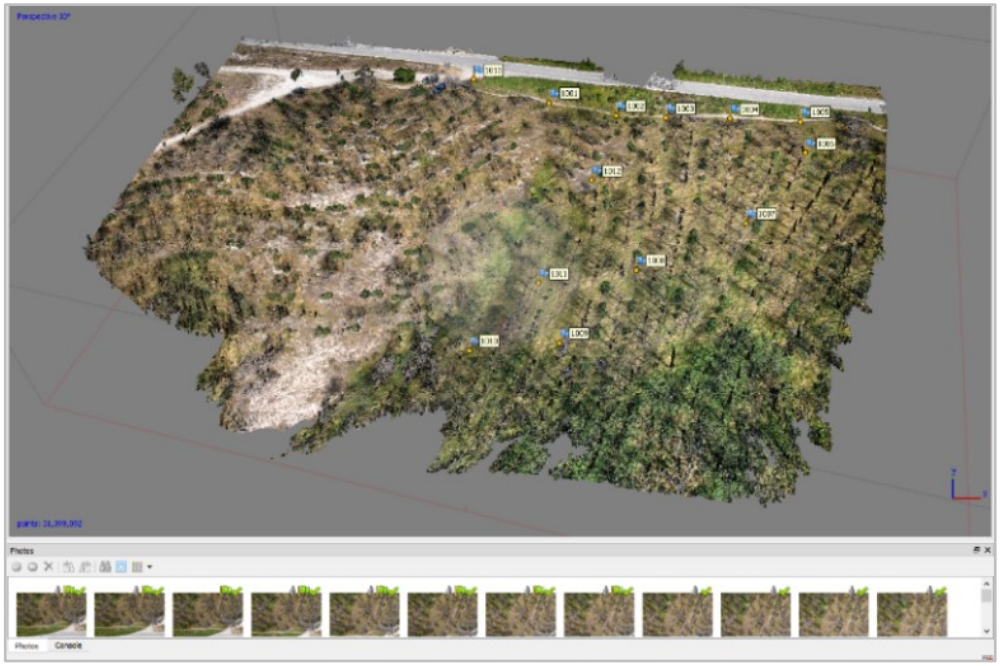


Figura 50: Nuvola di punti densa con marker (fonte: elaborazione dati Agisoft Photoscan)

Le possibili deformazioni non lineari dovute all'ottica della fotocamera possono essere corrette tramite il processo di ottimizzazione che sfrutta anche la conoscenza delle coordinate dei punti di riferimento. Il software calcola i parametri del modello di deformazione dell'ottica della camera, cercando di minimizzare lo scostamento del modello dalle coordinate di riferimento dei GCP. Inoltre, offre la possibilità di escludere le immagini sfuocate dalla lavorazione, facendo una stima e segnalando automaticamente la qualità di ogni immagine; quelle con un valore numerico inferiore a 0,5 unità indicato come limite, sono state escluse dalla elaborazione fotogrammetrica, a condizione che il resto delle foto coprissero tutta la scena da ricostruire.

Successivamente abbiamo generato un modello con una nuvola di punti densa (Figura 51).

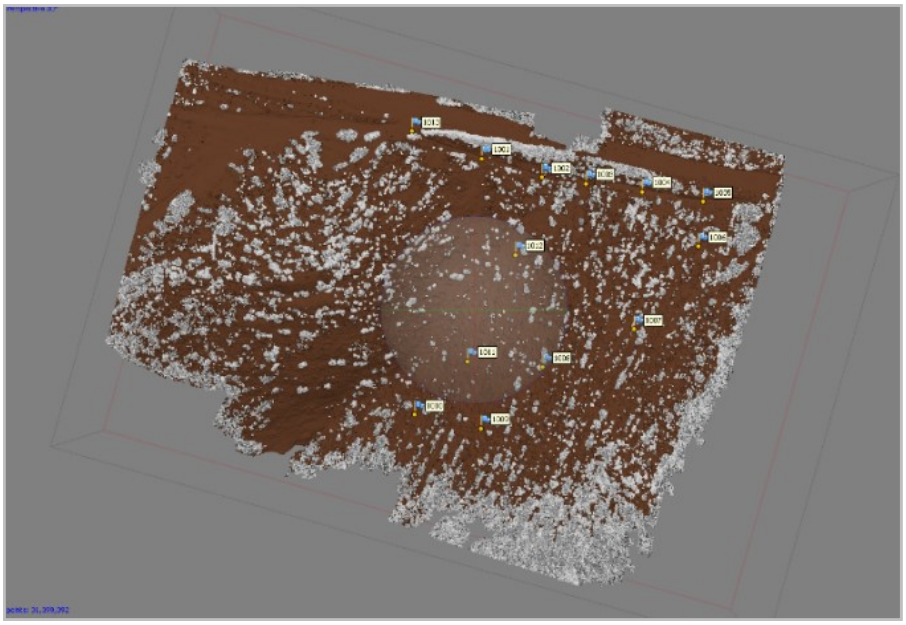


Figura 51: Classificazione della nuvola densa per riconoscere i punti del terreno (fonte:elaborazione dati Agisoft Photoscan)

Infine, abbiamo esportato le due mesh (*ground e off-ground*) ed elaborato il modello digitale del terreno (DTM).

2.6.2.3 *Estrazione variabili dendrometriche*

Per le analisi statistiche e l'estrazione delle variabili dendrometriche degli individui arborei presenti nell'area campione (diametro a 1.30 del fusto e altezza totale dell'albero) abbiamo utilizzato il software QGIS versione 3.4.

Il primo passo per l'estrazione dei diametri è stato utilizzare *DBscan Clustering,* un algoritmo basato sulla densità di punti. Una volta importata la nuvola di punti sezione 1.25-1.35 m (esportata da Cloud Compare in formato testo e salvata in Qgis in formato ".sqlite") questo algoritmo ha raggruppato i punti vicini contrassegnando quelli isolati nelle regioni a bassa densità (Verma *et al.*, 2012).

In seguito ad un'attenta analisi visiva della nuvola di punti, abbiamo selezionato i diversi parametri di formazione *clustering*, come il numero minimo di punti richiesti per formare una regione densa e la distanza massima tra i punti di uno stesso cluster (Figura 52).

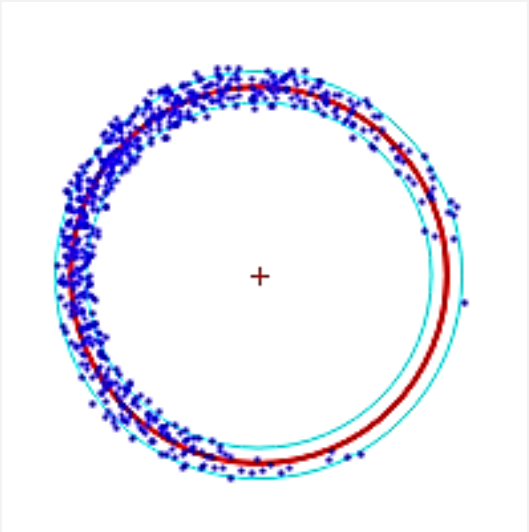


Figura 52: Cluster con punti rilevata con tecnologia SLAM e circonferenza media del singolo individuo

A seguire con il tool *Geom. di delimitazione minima* abbiamo creato delle geometrie utilizzando come input di delimitazione perimetrale i cluster formati precedentemente.
Su quest'ultime, siamo andati a determinare i centroidi di ogni singolo poligono rappresentanti i punti centrali delle singole piante. La scelta di non utilizzare la media delle coordinate è derivata da prove antecedenti che hanno confermato una scarsa precisione soprattutto in quei cluster con nuvola di punti più densa verso un lato.
Successivamente ci siamo calcolati le distanze di ogni punto dei cluster corrispondenti (funzione: *Unisci con Linee*) e ricavati le statistiche per cluster ID, fra cui la media per ogni cluster che rappresenta il raggio per ogni pianta.
A questo punto, unendo le informazioni delle Statistiche ai layer Centroidi e Cluster, è stato possibile filtrare ed escludere quei *cluster* con alta dispersione dei punti, in base al rapporto deviazione standard su media troppo elevato. È stato applicato un ulteriore filtro per escludere i punti che si allontanavano troppo dalla media calcolata.
Avendo un nuovo *layer* di partenza "Cluster con punti Filtrati" si è ripetuta la stessa procedura descritta precedentemente, per calcolare al meglio il posizionamento e le statistiche derivanti dall'analisi.
Per l'estrazione delle altezze, invece, abbiamo caricato in Qgis oltre che la nuvola di punti (*off-ground Point Cloud*) anche il DTM elaborato con i dati rilevati da volo APR del 2018. L'utilizzo di quest'ultimo è stato essenziale per ricavare la quota della base delle piante, effettuando le letture nelle posizioni dei centroidi (ipoteticamente il nostro fusto dell'albero).
Con la funzione *Poligoni di Voronoi* e *Buffer* ci siamo ricavati le singole "Aree di competenza" di ciascun centroide (associato al cluster corrispondente), e con "*Unisci attributi per posizione*

(riassunto)" (layer in ingresso: aree di competenza, vettore di join: off-ground Point Cloud) è stato possibile ricavare l'altezza massima dei punti per singola area di competenza (Figura 53).

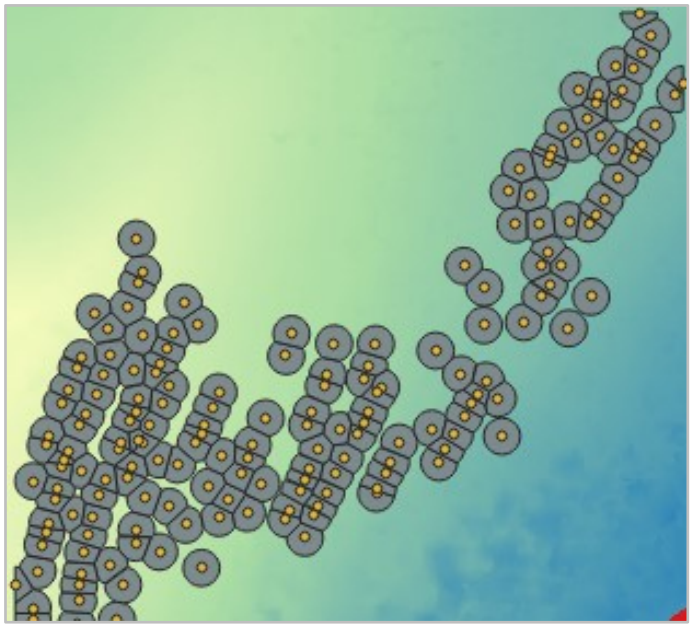


Figura 53: Aree di competenza con centroidi (in giallo) su base DTM (ground) con rispettive aree di competenza (grigie)

Abbiamo associato l'altezza massima ai centroidi e calcolato un nuovo campo (*Tree Height*) tramite differenza tra la quota massima e la quota di base ricavata dal DTM.

I dati dendrometrici e i valori ottenuti sono stati inseriti in fogli di calcolo dove sono stati riordinati in tabelle per ricollegare i valori di una stessa pianta target (cluster) in base alle caratteristiche dimensionali dell'individuo.

Capitolo 3
RISULTATI

3.1 **Severità e recupero vegetazionale con dati satellitari**

Il perimetro dell'incendio ottenuto dall'elaborazione delle immagini Sentinel-2 è stato in primo luogo confrontato con quello rilevato precedentemente con immagini Landsat e poi con quello rilevato in campo da parte dei Carabinieri Forestali (CF) (Figura 54).
La superficie incendiata definito con immagini Sentinel-2 è di 189 ettari di poco superiore a quella ottenuta con immagini Landsat (184.4 ha), ambedue superiori a quella rilevata a terra dai CF (176.6 ha).

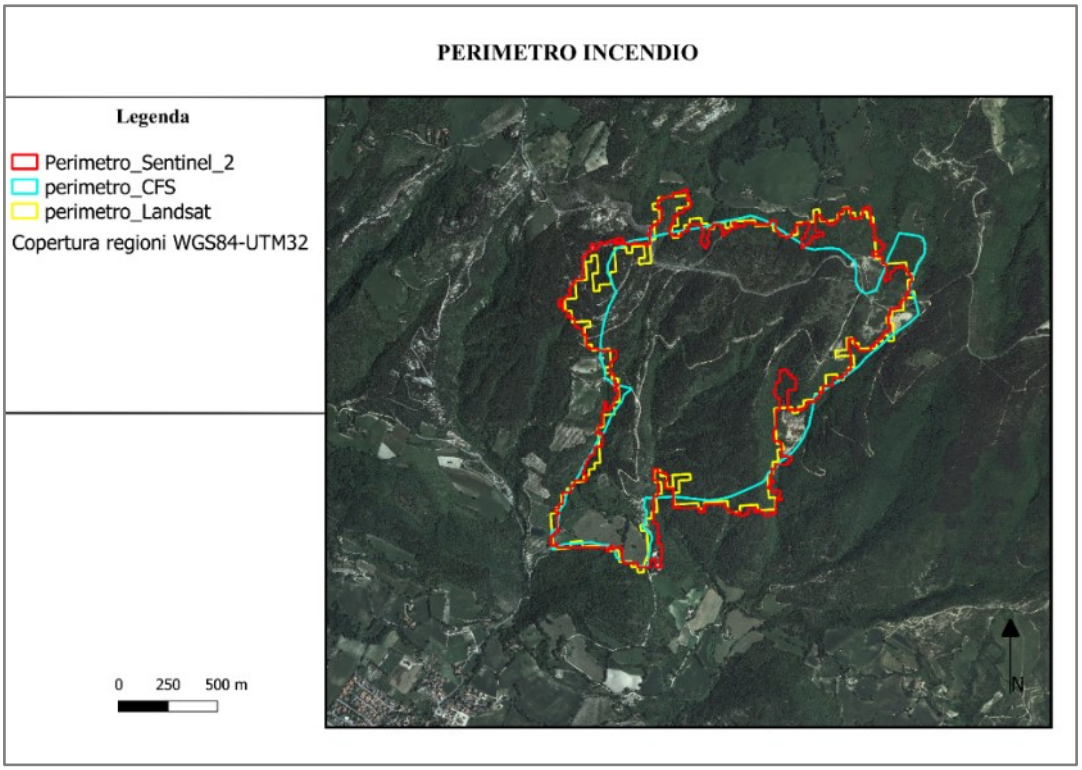
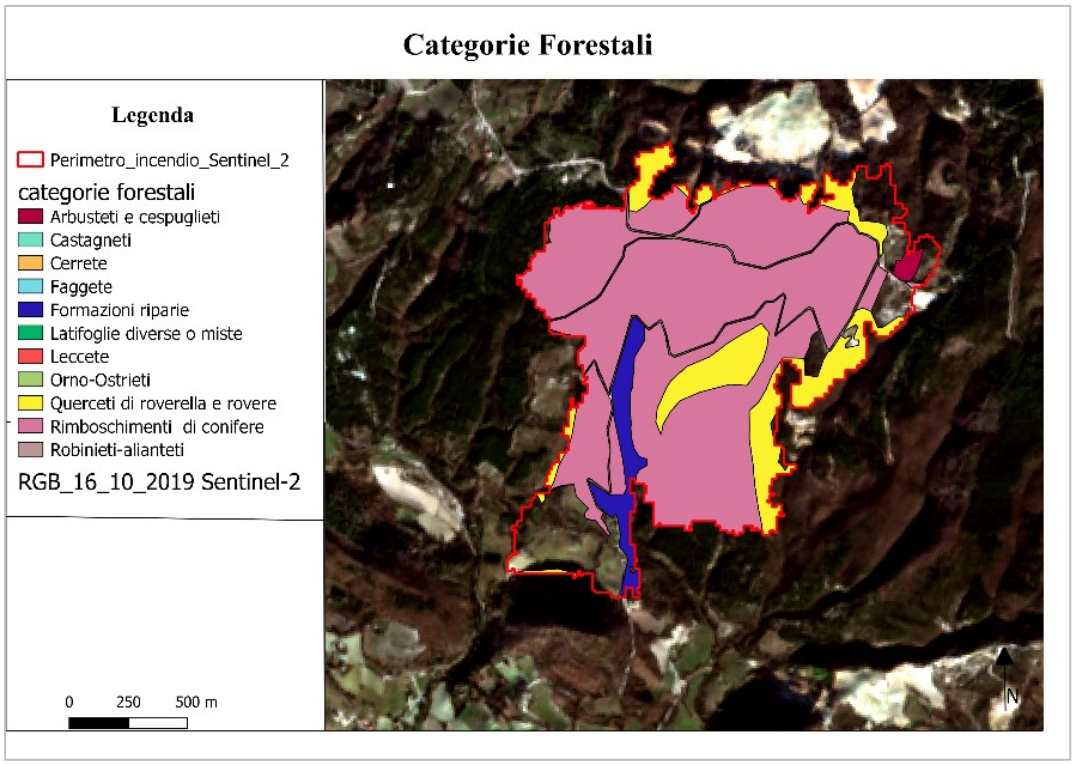


Figura 54: Perimetro dell'incendio delle Cesane rilevato con metodi e/o strumenti diversi

L'area incendiata, in base all'Inventario e Carta Forestale della Regione Marche (IPLA, 2001) era prevalentemente caratterizzata da formazioni forestali a prevalenza di rimboschimenti di conifere, querceti, formazioni ripariali ed arbusteti e cespuglieti (Figura 55).



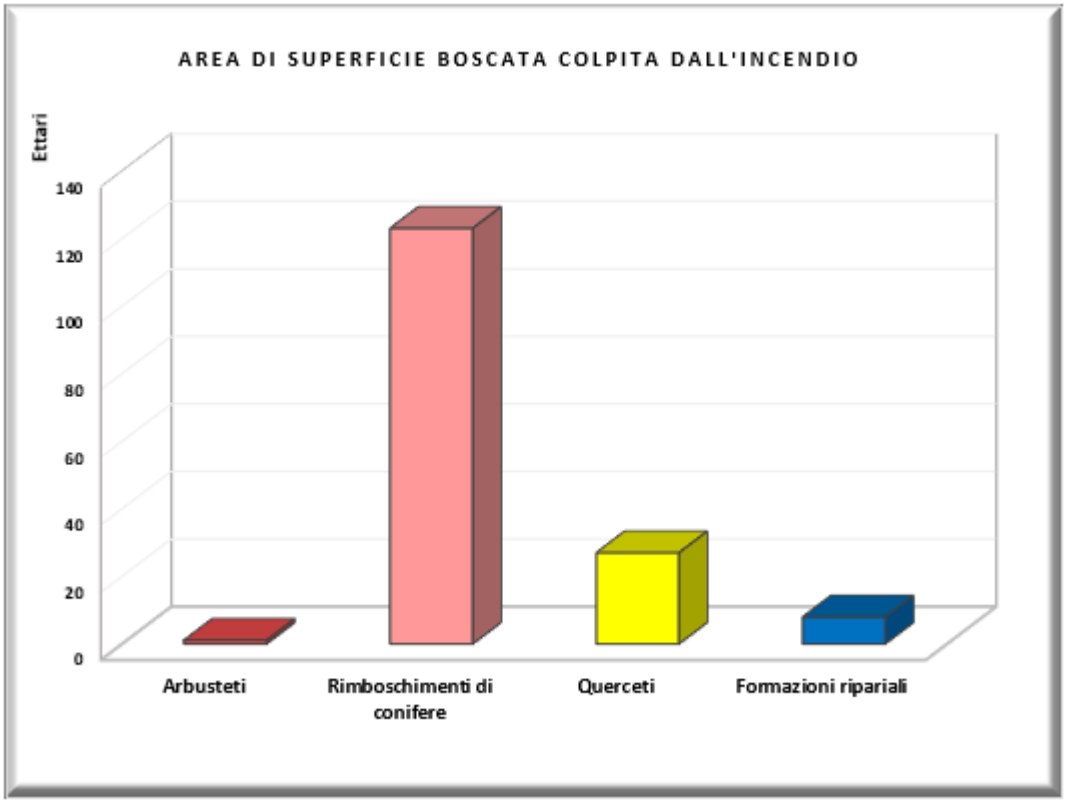


Figura 55: Distribuzione spaziale (sopra) e quantitativa (sotto) delle categorie forestali nell'area incendiata (IPLA, 2001);

Con il calcolo del dNBR sulle immagini Sentinel-2 pre e post incendio è stato possibile realizzare una carta classi di severità, che esprimono graficamente gli effetti quali-quantitativi dell'incendio secondo una specifica scala cromatica (Figura 56). Per confronto si riporta anche quella prodotta con dati Landsat che risulta decisamente meno definita della prima. (Brutti, 2017).

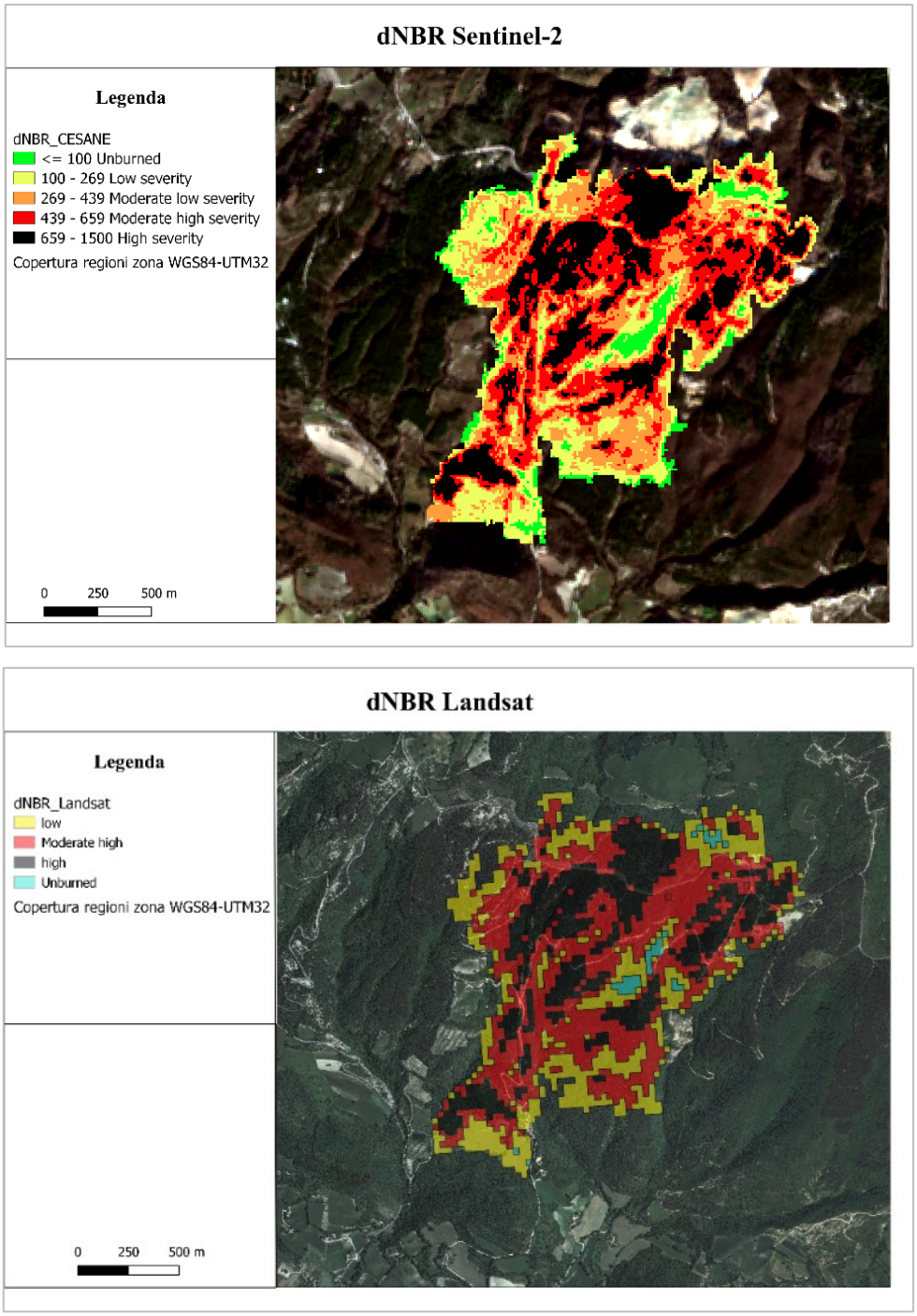


Figura 56: Carta della severità dell'incendio delle Cesane ottenuta utilizzando dNBR su immagini Sentinel-2 (in alto) e Landsat (in basso)

Globalmente le categorie forestali interessate dal fuoco risultano aver subito danni *moderati – alti* e il pattern di distribuzione della severità *moderata – alta* ed *alta* sembra legato alla presenza dei rimboschimenti, ma anche alla morfologia del territorio.

La classe di severità maggiormente rappresentata è la classe 4 (*moderata alta*) che interessa 49,99 ha; a seguire la classe 3 (*moderata – bassa*) con 46,63 ha, la classe 5 (*alta*) con 42,15 ha, la classe 2 (*bassa*) con 39,5 ha, ed infine la classe 1 (*unburned*) con 10,86 ha (Figura 57).

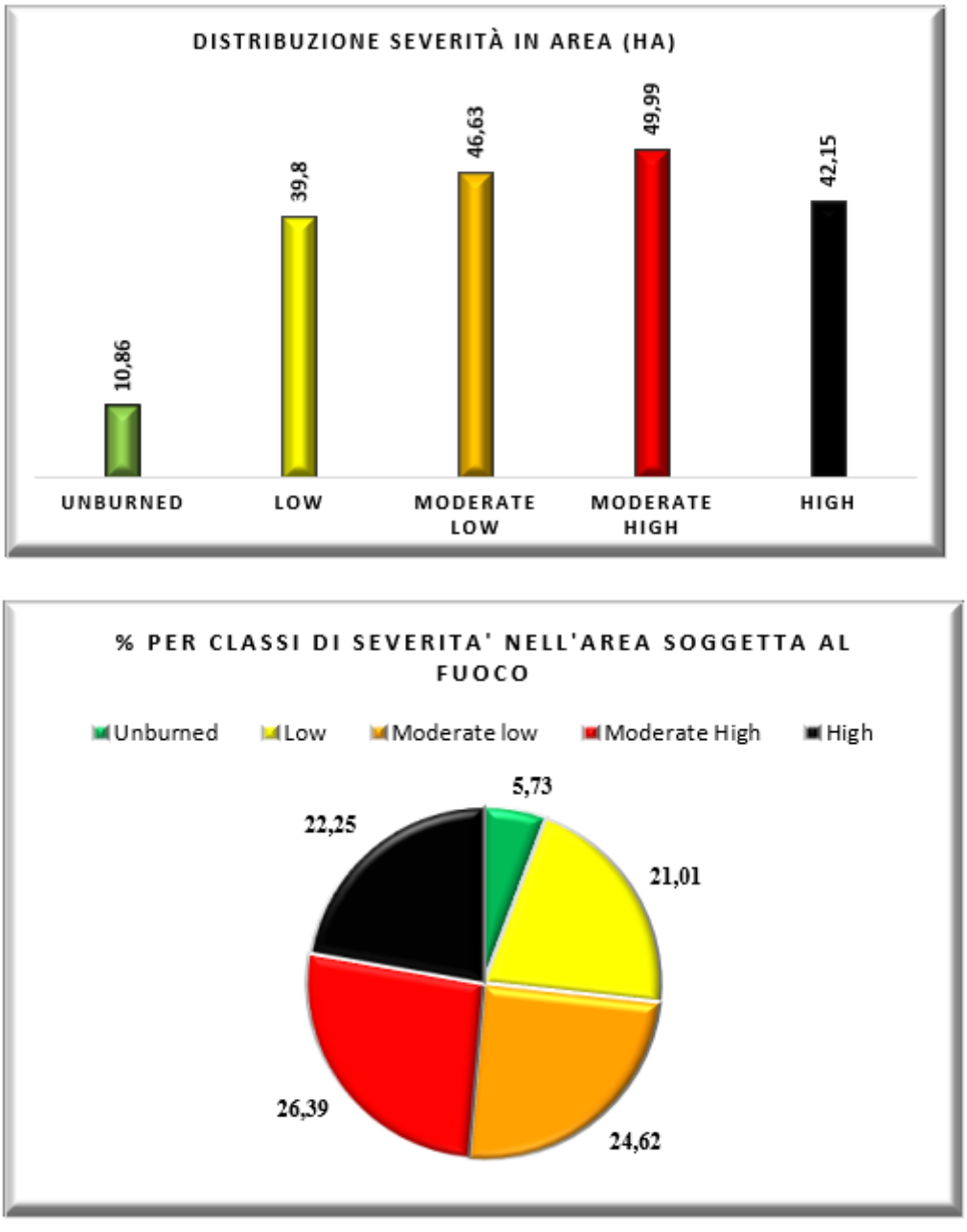


Figura 57: Distribuzione in valori assoluti (in alto) e in percentuale (in basso) della superficie dell'incendio in classi di severità

La categoria forestale maggiormente colpita è quella dei rimboschimenti di conifere (prevalenza di pino nero) dove oltre il 50% della sua superficie è stato caratterizzato da una severità *alta* (32,32 ha) e *moderata-alta* (37,20 ha) (Figura 58).

I Querceti (di rovere e roverella) sono l'unica altra categoria con dati minimamente significativi che evidenziano una prevalenza di classi di severità medio-bassa.

Le altre categorie forestali occupano superfici molto ridotte ed hanno un'incidenza globale irrilevante, sebbene per esempio gli arbusteti e cespuglieti siano stati interamente classificati ad alta severità (Tabella 7).

Tabella 7: dNBR medio per categoria forestale

CATEGORIA FORESTALE	***DNBR MEDIO***	***AREA (HA)***
ARBUSTETI	*779,11*	*1,076*
RIMBOSCHIMENTI	*513,099*	*123,093*
QUERCETI	*305,859*	*26,999*
FORMAZIONI RIPARIALI	*368,560*	*7,967*

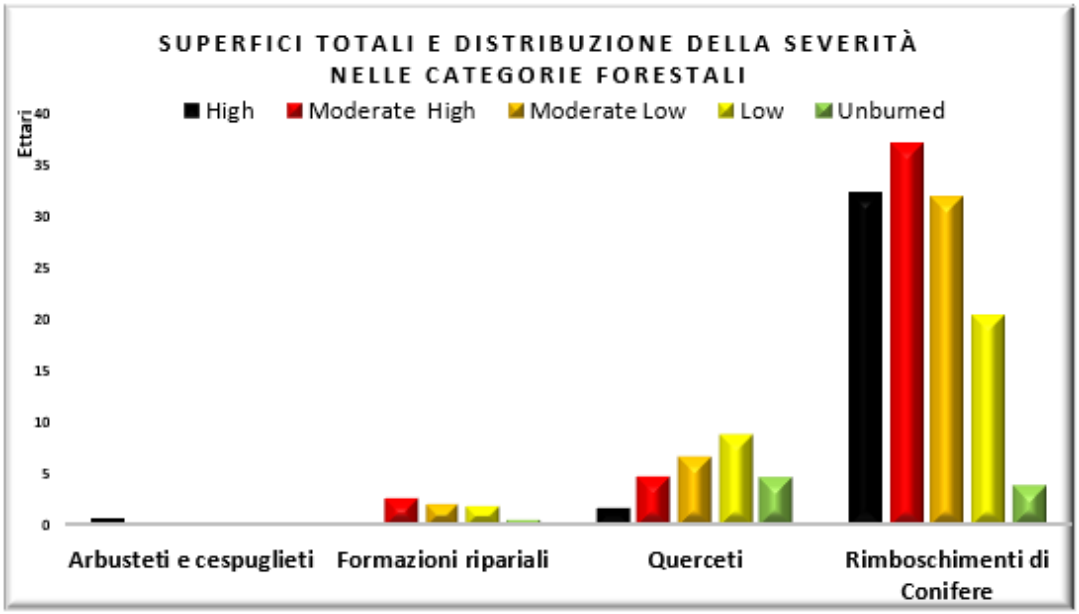


Figura 58:Classi di severità per categoria forestale

3.1.1 *Dinamismi post-incendio con indici di vegetazione*

I risultati, relativi ai due anni trascorsi dall'evento 2017, sono dapprima presentati in maniera indistinta per l'area forestale interessata dall'incendio suddivisi per classi di severità.
I valori dell'indice NDMI, che risentono anche del contenuto idrico della vegetazione presente, evidenziano che, immediatamente dopo l'incendio l'indice subisce un decremento, per poi incrementare gradualmente nelle date successive riavvicinandosi allo stato pre – incendio. In particolare, tra il 31-05-2018 e il 20-07-2018, tratto in cui le differenze delle curve per classi di severità sembrano assottigliarsi, si nota un picco negativo dell'indice, probabilmente influenzato dall'andamento stagionale legato alle condizioni xeriche del periodo estivo, raggiungendo il minimo con un valore di -0.61 il 31-10-2018. A seguire le curve incrementano leggermente raggiungendo un massimo di -0.45 il 16-04-2019 per poi diminuire nuovamente.

NDMI nello specifico, è risultato un indice fortemente influenzato dall'andamento stagionale di questi anni, considerando anche l'assenza di copertura forestale e la perdita di sostanza organica in seguito all'incendio, contribuendo ad aumentare l'evapotraspirazione al suolo (Figura 59).

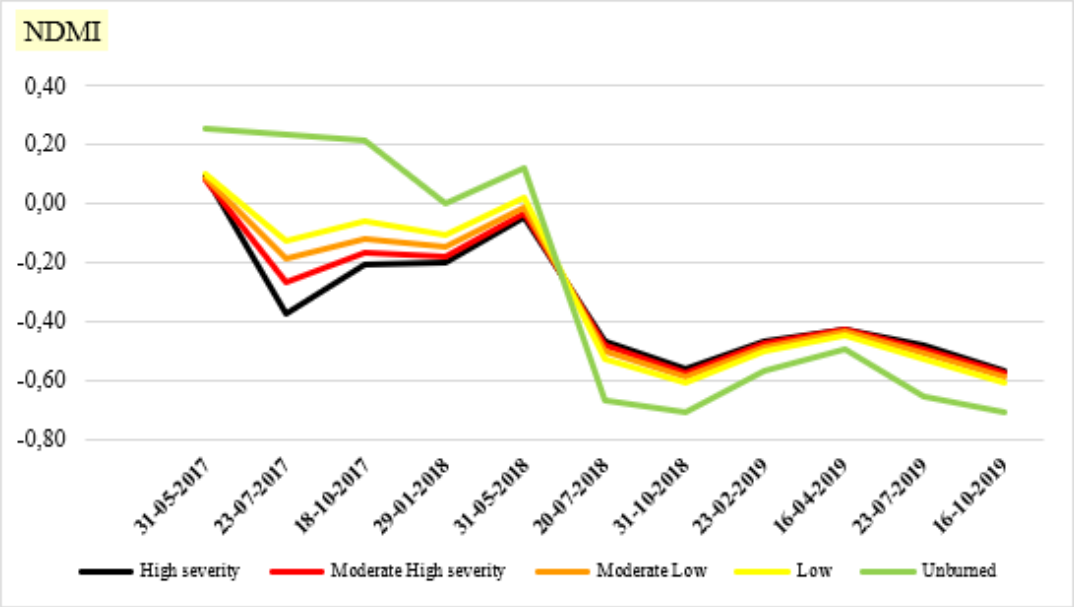


Figura 59:Variazione dei valori NDMI calcolati per ogni classe di severità (nel periodo compreso fra 31-05-2017 e 16-10-2019 nell'area bruciata delle Cesane)

Gli indici NDVI e NBR2 risultano più efficaci per analizzare i cambiamenti di copertura avvenuti nelle superfici incendiate.

Entrambi gli indici evidenziano dinamiche simili dopo l'incendio (23-07-2017), pur mostrando intensità di variazione differenti, rispettivamente del 65% per NDVI e 71% per NBR2 rispetto al valore medio della *reference*. A distanza di due anni i valori relativi sono inferiori al 27% (NDVI) e 32% (NBR2) del valore medio rilevato nella curva di confronto (Figura 60 Figura ***61***).

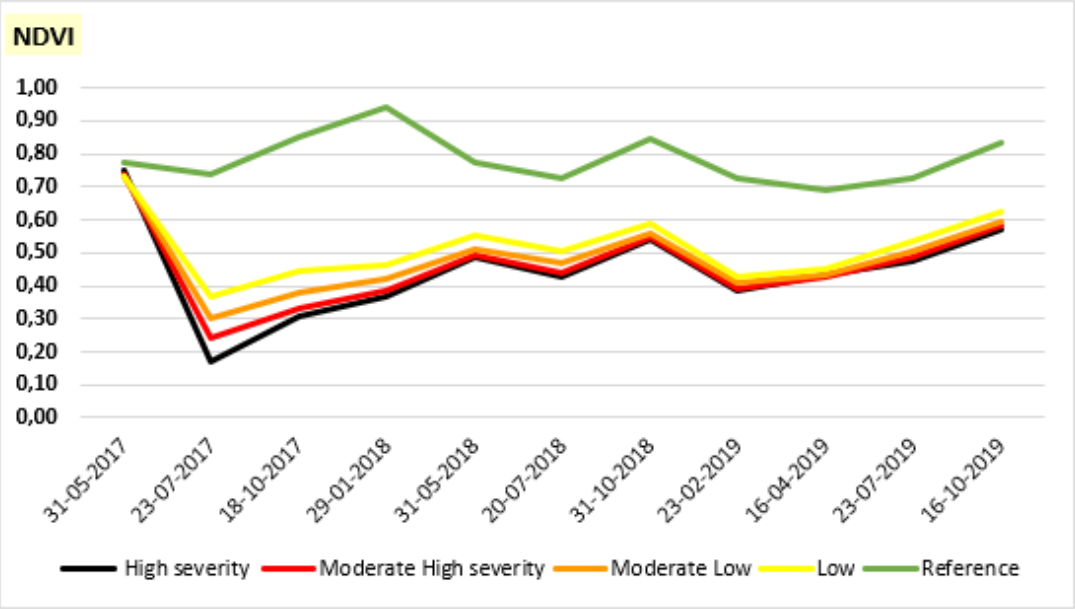


Figura 60: Variazione dei valori NDVI calcolati per ogni classe di severità (nel periodo compreso fra 31-05-2017 e 16-10-2019 nell'area bruciata delle Cesane)

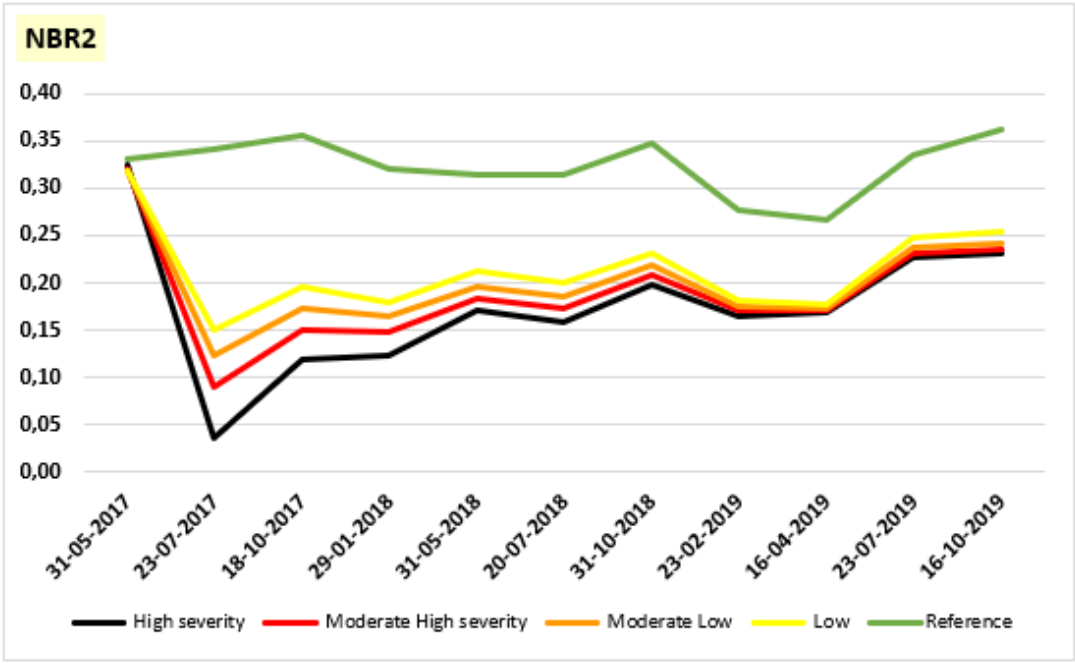


Figura 61: Variazione dei valori NBR2 calcolati per ogni classe di severità (nel periodo compreso fra 31-05-2017 e 16-10-2019 nell'area bruciata delle Cesane)

Prima dell'incendio gli indici rilevano una copertura vegetale efficiente evidenziata dallo stesso punto di origine di tutte le curve. Subito dopo l'evento (23-07-2017), tutte le curve salvo la *reference* diminuiscono repentinamente per la perdita completa di copertura (superficie fotosintetizzante) e soprattutto nelle superfici ad *alta severità*.

Nel grafico di NDVI, già sei mesi dopo l'incendio (18-10-2017/29-01-2018) le aree ad *alta severità* sembrano recuperare più rapidamente delle altre, come evidenzia la maggiore inclinazione della curva. Qui il cambiamento è stato repentino con perdita completa di biomassa fogliare, confermato dall'aumento immediato di riflettanza nello SWIR e la diminuzione nel NIR.

Inoltre, le differenze tra le curve di severità sembrano assottigliarsi già dal 29-01-2018, fino ad incontrarsi il 31-05-2018, ad eccezione della curva di severità *bassa,* che mantiene una discrepanza fino al 31-10-2018.

Questo non si verifica nell'analisi di andamento del NBR2, in cui le curve sono nettamente distinte fino a più di un anno dopo l'incendio (31-10-2018) per poi sovrapporsi il 23-02-2019. NBR2, nell'ultimo anno, incrementa più lentamente rispetto a NDVI che tende a recuperare maggiormente i valori pre-disturbo. Questa differenza di comportamento è dovuta alla risposta spettrale della vegetazione erbacea sull'area colpita dall'incendio, con un aumento di riflettanza del NIR e quindi dei valori dell'indice. NBR2 non prendendo in considerazione questa banda è meno sensibile alla risposta spettrale della copertura erbacea che si è sostituita a quella arborea.

Figura 62: Pineta di pino nero alle Cesane percorsa dal fuoco nel mese di luglio 2017 con copertura erbacea diffusa fra gli individui di pino morti (rilievo del 5-07-2019)

In generale, il comportamento degli indici NDVI e NBR2 evidenzia che nei primi mesi dopo il disturbo, le comunità vegetali rispondono in maniera pronunciata, con una variazione dei valori maggiore nelle classi di severità *media* ed *elevata*, per poi tendere a un equilibrio (più o meno velocemente) con tutte le classi nell'anno successivo. La permanente distanza dalla *reference* evidenzia comunque che, indipendentemente dalla severità, a più di due anni dopo l'incendio la copertura nelle aree bruciate è modesta è costituita prevalentemente da vegetazione erbacea.

Analizzando gli stessi dati per le categorie forestali si osserva che i rimboschimenti di conifere mostrano per tutti e due gli indici una diminuzione dei valori medi, mentre per quanto riguarda le dinamiche di rinnovazione, si riscontrano valori medi nei rimboschimenti inferiori alle altre categorie per l'intero periodo analizzato e quindi una lenta saturazione dell'indice a tornare alla situazione pre-incendio.

Le dinamiche di recupero tra le categorie seguono trend simili con entrambi gli indici, non raggiungendo valori paragonabili a quelli registrati prima del disturbo nel breve periodo considerato, e con differenze dovute alla classe di severità di ciascuna categoria forestale (Figura 63Figura ***64***).

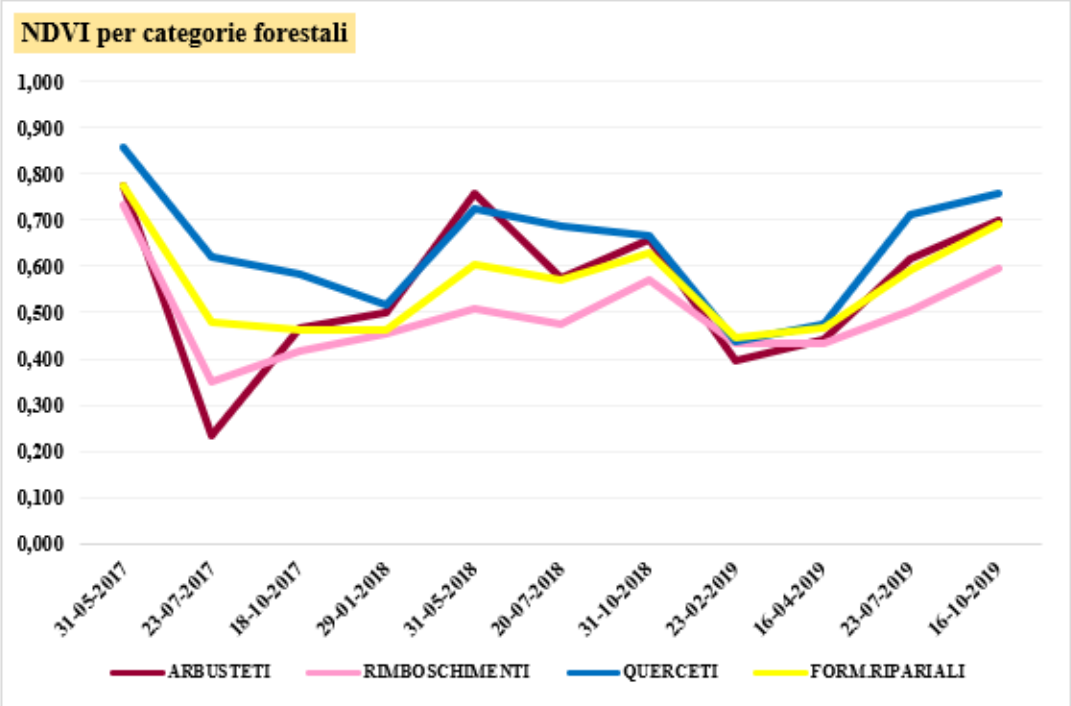


Figura 63:Andamento dei valori di NDVI distinti per categoria forestale nel periodo compreso fra 31-05-2017 e 16-10-2019.

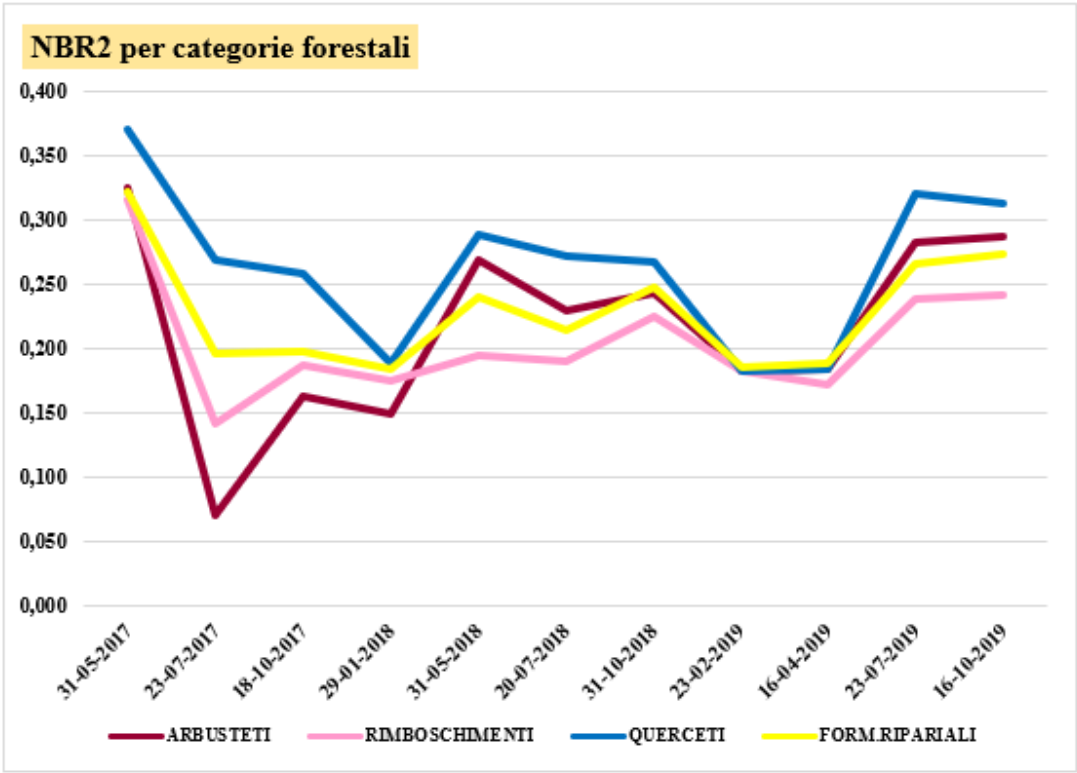


Figura 64: Andamento dei valori di NBR2 distinti per categoria forestale nel periodo compreso fra 31-05-2017 e 16-10-2019

3.2 **Costruzione di un modello DTM da rilievo fotogrammetrico**

Dall'elaborazione dati del rilievo fotogrammetrico del 16-04-18 abbiamo ricavato il Modello Digitale del Terreno per una porzione significativa dell'area bruciata (circa 35 ha) (Figura 65).

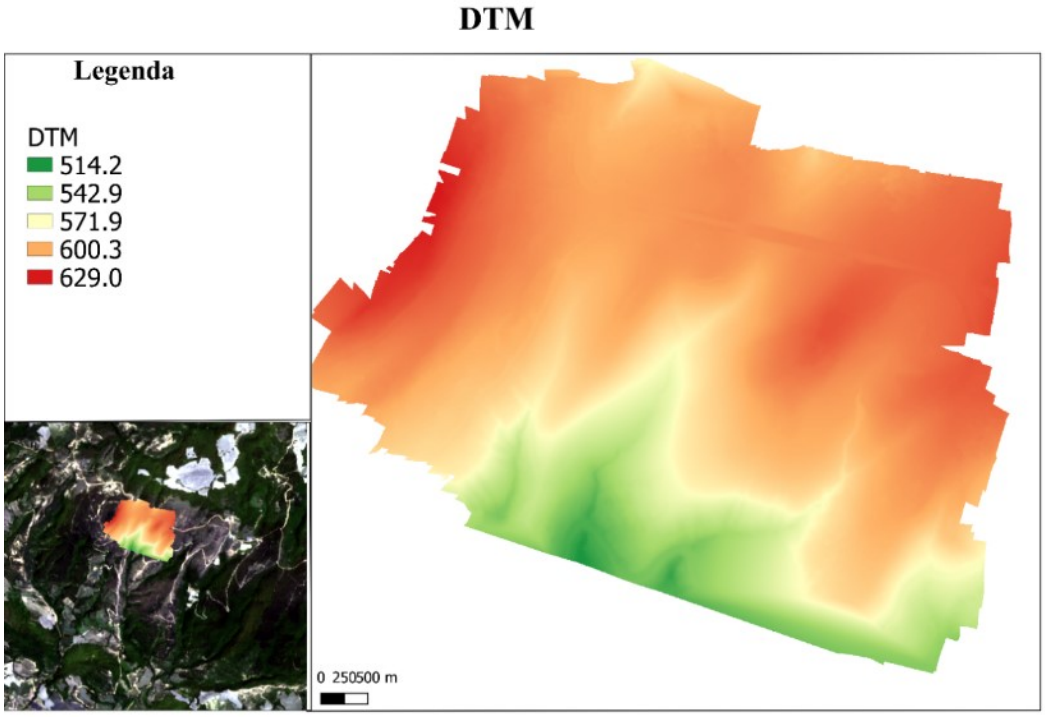


Figura 65: Digital Terrain Model costruito per una porzione dell'area bruciata nella foresta demaniale delle Cesane

I rimboschimenti, che rappresentano anche la categoria forestale maggiormente e severamente interessata dal fuoco, si distribuiscono con una quota media (riferita all'ellissoide WGS84) di 592 m slm. I querceti sono ad una quota leggermente inferiore (570 m slm) mentre le formazioni ripariali a 524 m slm.

Le diverse carte estratte dal DTM tramite elaborazioni Qgis sono state l'ombreggiatura, la pendenza ma anche le principali curve di livello su base cartografica di rilievo (Figura 66Figura ***67***Figura ***68***).

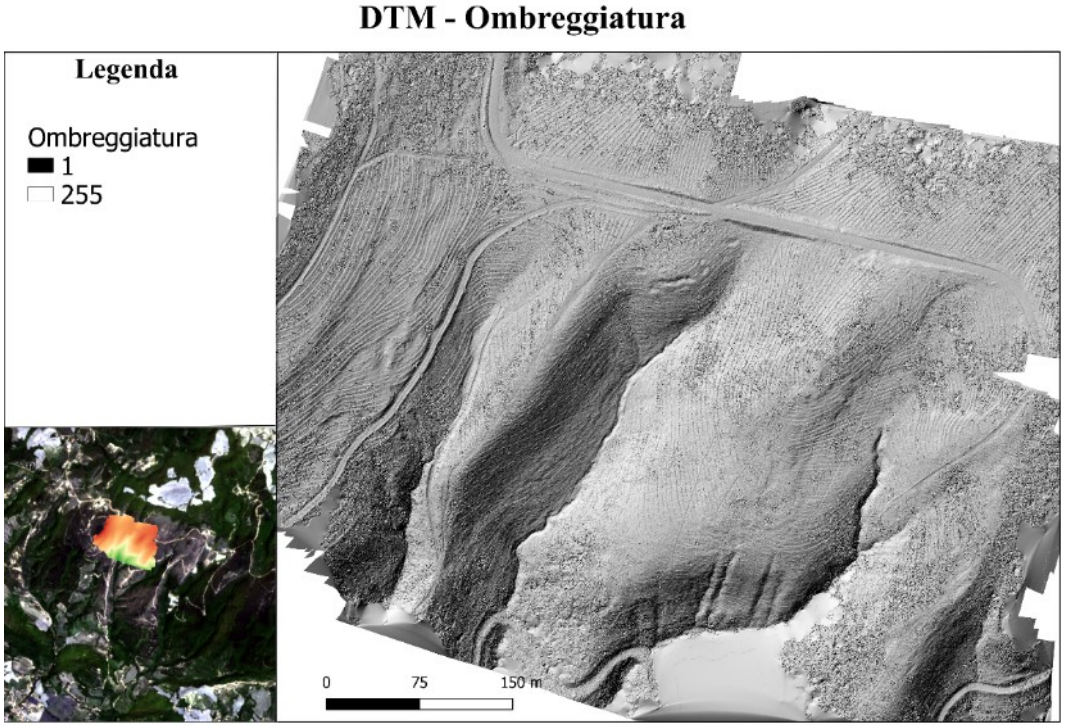


Figura 66: Carta ombreggiamento da DTM per una porzione dell'area bruciata nella foresta demaniale delle Cesane.

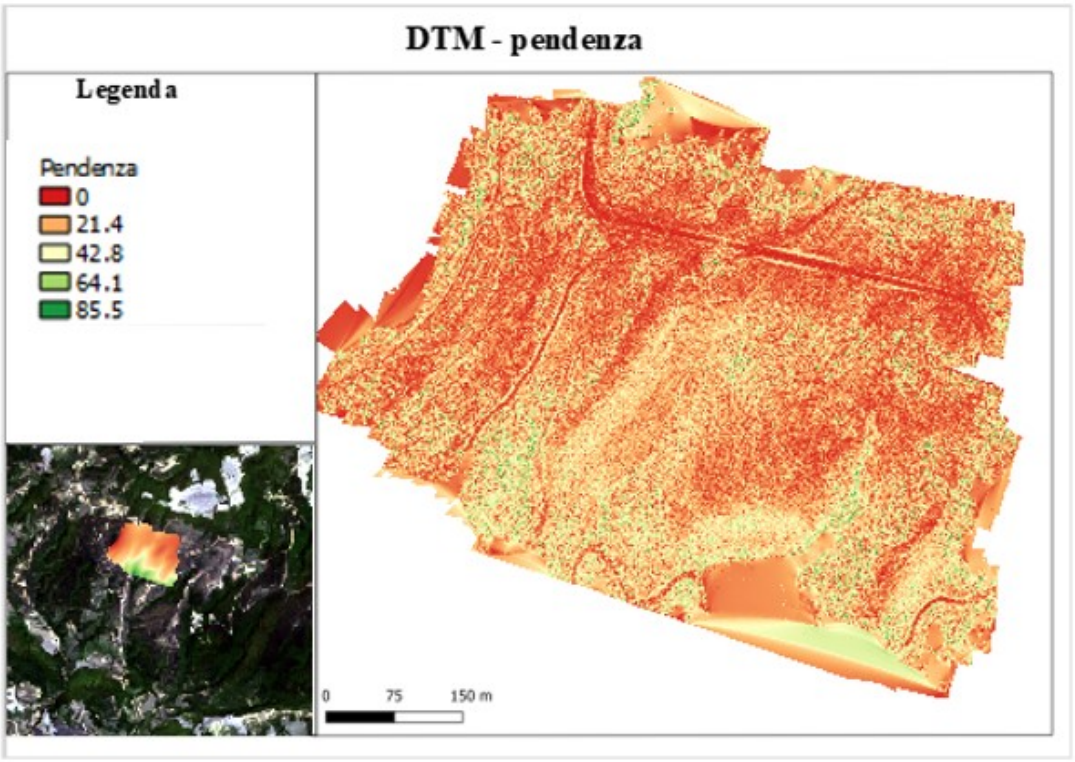


Figura 67: Carta della pendenza da DTM per una porzione dell'area bruciata nella foresta demaniale delle Cesane.

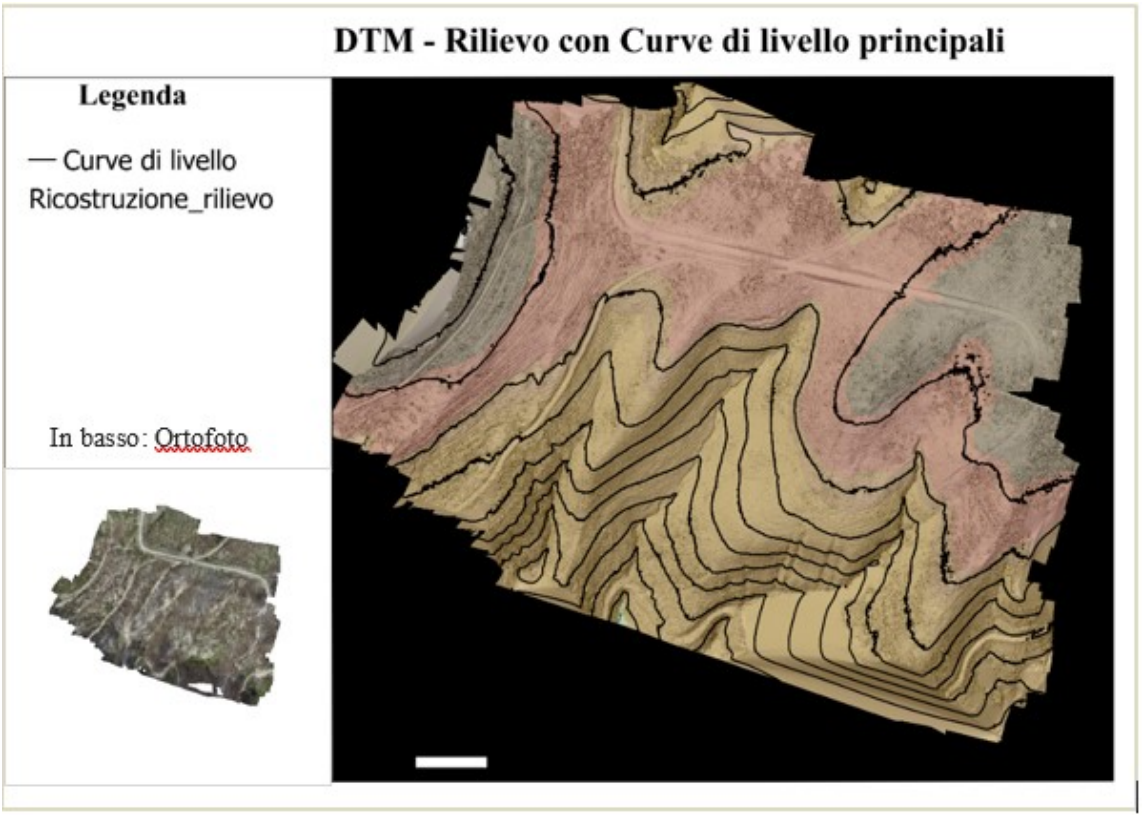


Figura 68: Carta rilievo con con curve di livello principali (equidistanza 10m) da DTM per una porzione dell'area bruciata nella foresta demaniale delle Cesane.

3.3 **Utilizzo della tecnologia SLAM per il rilievo dendrometrico del soprassuolo percorso da incendio**

Dall'elaborazione dati del rilievo fotogrammetrico del 5-07-19 è stato costruito il Modello Digitale del Terreno dell'area ed estrapolata l'ortofoto (Figura 69- Figura ***70***).

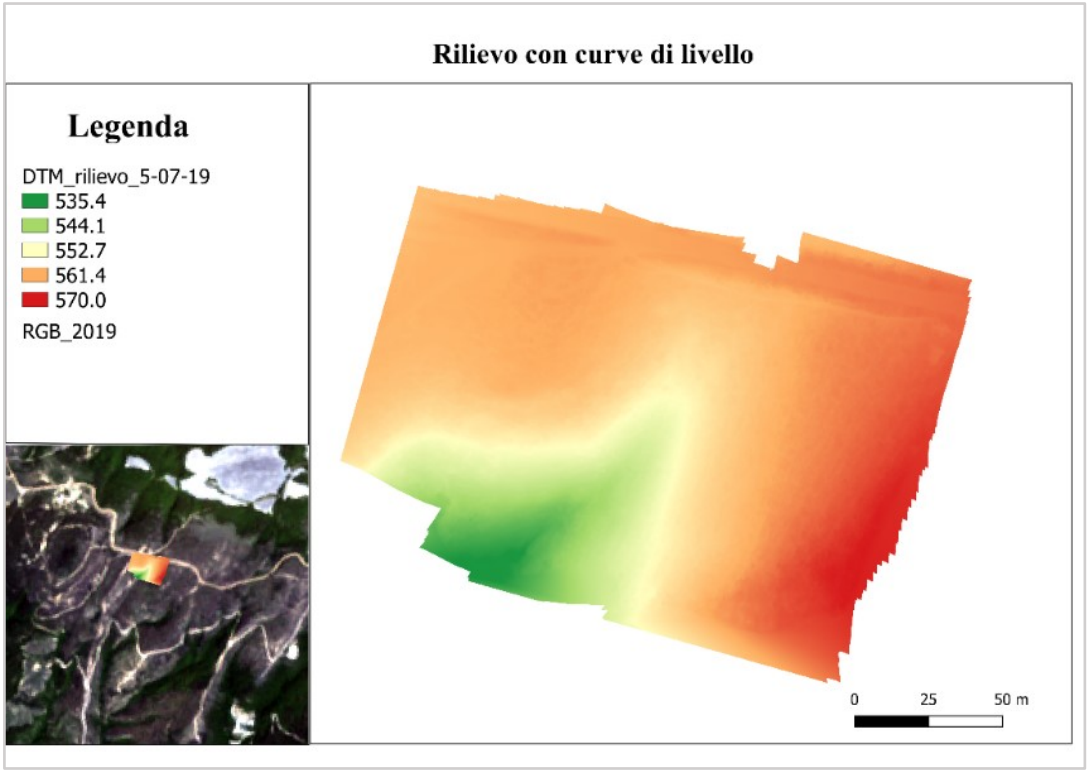


Figura 69: Digital Terrain Model costruito per una porzione dell'area bruciata nella foresta demaniale delle Cesane. Rilievo del 5-07-2019

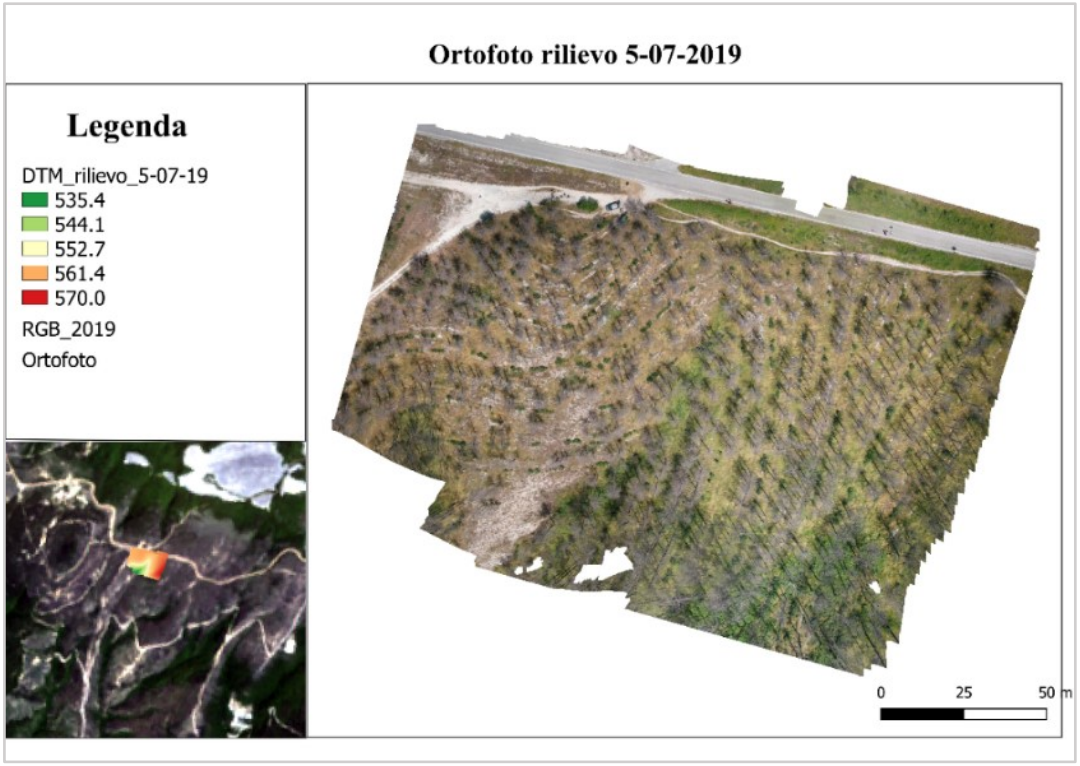


Figura 70: Ortofoto costruita per una porzione dell'area bruciata nella foresta demaniale delle Cesane. Rilievo del 5-07-2019

L’area rilevata con il drone in cui è localizzata l’area campione SLAM ha una superficie di circa 3,35 ha all’interno della quale sono state determinate le variabili dendrometriche di 175 individui (Figura 71).

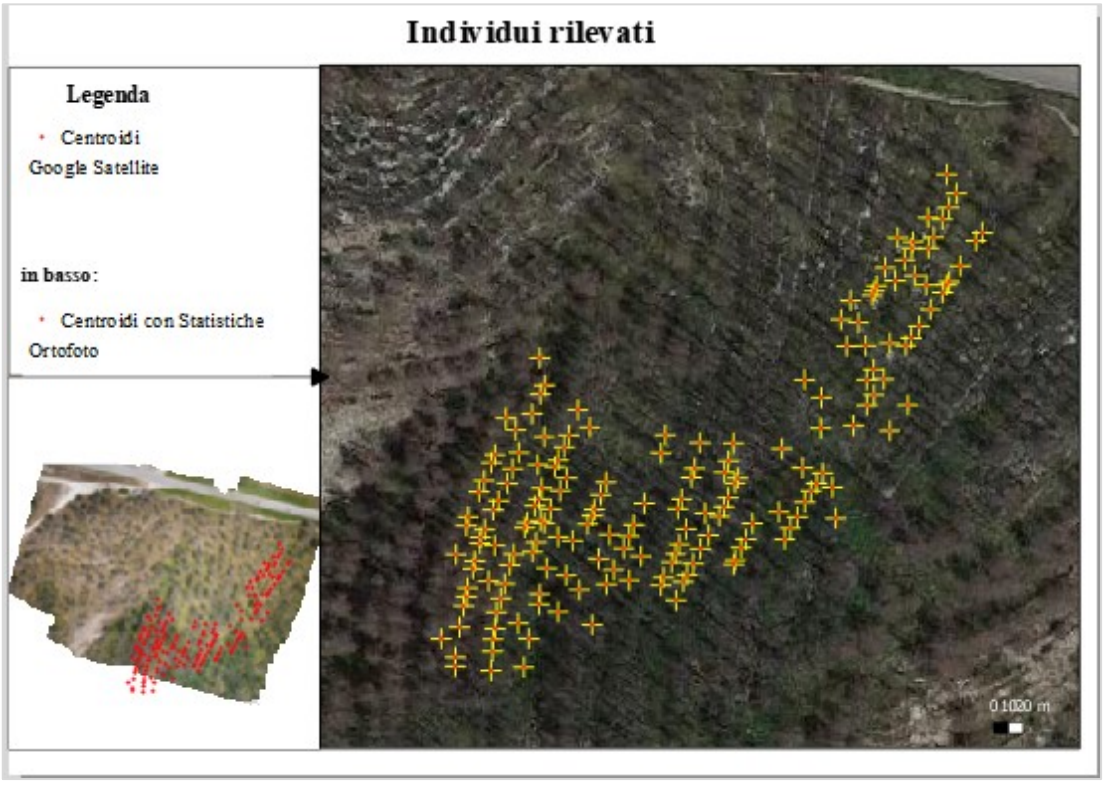


Figura 71: Centroidi degli individui rilevati con tecnologia SLAM

La distribuzione dei diametri rilevati con il sistema SLAM in classi diametriche di 5 cm è di tipo normare debolmente asimmetrico, riconducibile a un popolamento coetaneiforme oltre che coetaneo, dato l’impianto coevo della pineta. Circa il 50% degli individui infatti hanno dimensioni simili e sono compresi nella classe di 25 cm (Figura 72).
L’80% degli individui censiti è compresa nelle classi 20 – 25 e 30 cm; l’altezza media si aggira intorno ai 14.6 m (Tabella 8).
La curva ipsometrica è rappresentata nella Figura 73.

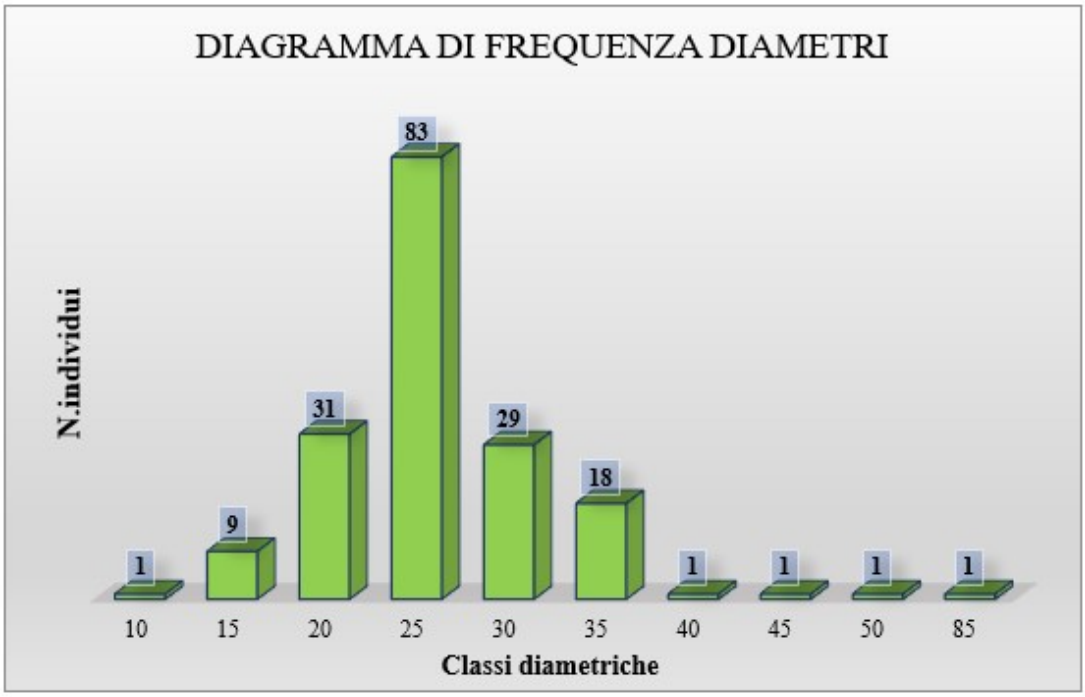


Figura 72: Distribuzione di frequenza dei diametri del fusto rilevati con SLAM alle Cesane

Tabella 8: Dati tabellari

Classi diametriche (cm)	*N. individui*	*Altezze medie (m)*
10	1	9,4
15	9	13,7
20	31	13,7
25	83	14,4
30	29	15,2
35	18	15,3
40	1	16,8
45	1	15,7
50	1	15,3
85	1	17,1
Totale	175	

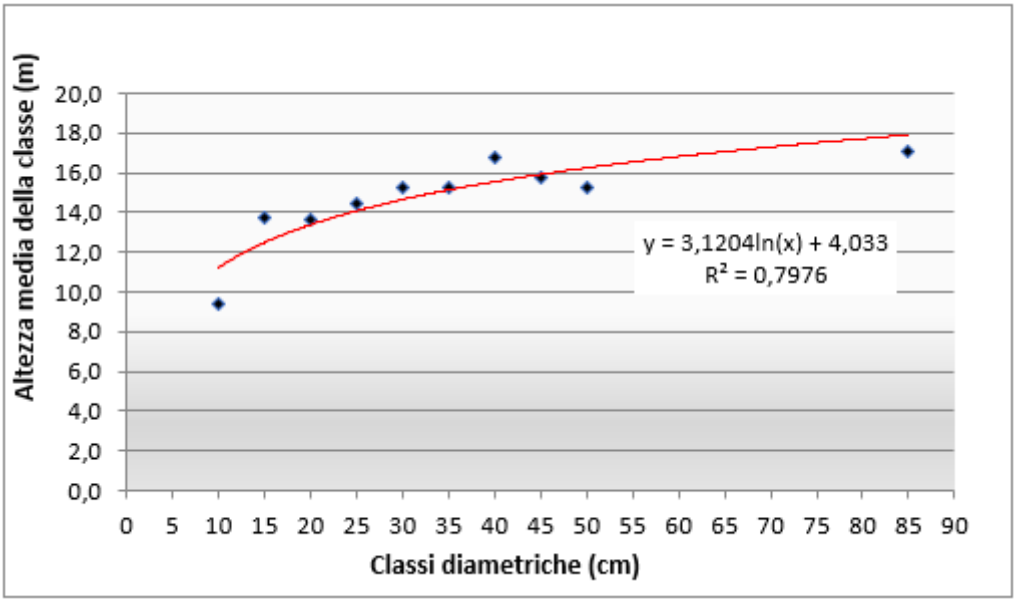


Figura 73:Curva ipsometrica del popolamento che mostra la variazione dell'altezza degli alberi in funzione della classe diametrica individuati con tecnologia SLAM

DISCUSSIONE

Gli obbiettivi principali del presente studio prevedevano la classificazione in base alla severità delle zone colpite dal fuoco e la verifica delle dinamiche di rinnovazione per un eventuale sistema di pianificazione; ulteriormente sperimentare una robusta alternativa ai tradizionali rilievi di campo.

Alcuni aspetti principali emergono dai risultati di questo lavoro:

- L'utilizzo di dati Sentinel rispetto a quelli Landsat aumenta notevolmente la precisione dei risultati ottenuti, non tanto nella definizione dei perimetri delle aree percorse dal fuoco, ma nella stima delle caratteristiche di severità degli incendi;
- l'utilizzo consolidato di indici per stimare la severità degli incendi e la conseguente capacità di recupero delle fitocenosi percorse dal fuoco è di grande ausilio nella pianificazione delle attività antincendio e degli indirizzi di gestione per la ricostituzione della copertura vegetale;
- la promettente possibilità di utilizzare tecniche innovative di rilevamento dendrometrico con tecnologia SLAM su popolamenti percorsi dal fuoco.

Relativamente al primo aspetto il confronto tra i dati sulla severità Landsat 8 e Sentinel-2 evidenzia una coerenza dal punto di vista dimensionale, nonostante la diversa risoluzione spaziale dei due sistemi. Landsat peraltro con risoluzione 30x30 produce un dato meno preciso nella classificazione della severità, che Sentinel-2 invece rileva, a seconda delle bande indagate con una risoluzione compresa fra 10 e 20m.

La missione Copernicus Sentinel-2 è caratterizzata da un elevato tempo di revisione (5 giorni con entrambi i satelliti gemelli) a differenza del dato Landsat (16 giorni), che però, a sua volta, offre continuità di disponibilità del dato da anni, molto utili per analizzare serie storiche (Sentinel-2A, è stato lanciato solo nel 2015, e il gemello 2B nel 2017).

Sebbene i dati provenienti da sensori ottici / multispettrali, come quelli di Landsat-8 e Sentinel-2, siano molto diversi, la loro combinazione può fornire risultati utili e interessanti. L'integrazione e la combinazione di questi dati possono trovare utili applicazioni in molti campi di studio: dagli oceani ai corsi d'acqua, dalle superfici terrestri ai depositi fossili, dalla vegetazione alle aree forestali (Addabbo *et al*., 2016).

Un ulteriore contributo ai rilievi post-disturbo è dato dall'utilizzo dei velivoli APR, i quali, per zone ampie, si contraddistinguono per la loro economicità, praticità e rapidità del dato. Infatti, attraverso software di elaborazione è possibile generare i vari modelli digitali di interesse

nell'ambito forestale come DTM, DSM (*Digital Surface Model*) e CHM (*Canopy Height Model*) ed avere una ricostruzione tridimensionale e fedele dello scenario sorvolato.
È opportuno rimarcare che tutti i modelli generati, indipendentemente dalla piattaforma e tecnologia usata, sono geolocalizzati e quindi utilizzabili in ambienti GIS (anche in *open-source*) e concorrono alla stima di una serie di indicatori inerenti al tipo di fitocenosi, la sua composizione e lo stato di salute che sono essenziali per guidare le scelte di gestione forestale sostenibile e delle tecniche di monitoraggio post-disturbo.

Relativamente al secondo aspetto l'applicazione di indici come il dNBR calcolato sulle recenti immagini Sentinel-2 ha permesso dapprima una stima molto più rigorosa rispetto ai dati Landsat e poi di valutare gli effetti della severità del fuoco sulle diverse comunità vegetali presenti. Valori positivi ed elevati di dNBR sono tipici nelle aree boschive e a prevalenza arbustiva, dove il fuoco generalmente crea stati di successione meno produttivi o precedenti (Roy *et al*. 2006).
Durante i due anni trascorsi dall'incendio, il processo di successione della vegetazione forestale, influenzato anche dai cambiamenti biofisici del sito, è ancora molto lento in particolare per il pino nero. Pausas *et al*., (1999) riportano che la severità del fuoco influenza anche i processi di rinnovazione, i quali sono strettamente dipendenti dalle strategie adottate da ciascuna specie.
Il soprassuolo principale costituito dal pino nero è stato completamente distrutto sia direttamente al passaggio del fuoco ma anche dopo alcuni mesi a seguito della forte scottatura delle chiome e dei tessuti meristematici del cambio cribro-vascolare.
Questo aspetto va tenuto in considerazione nell'analisi dei cambiamenti spettrali post-incendio nel medio – lungo termine, poiché la severità misurata con calcolo del dNBR subito dopo l'evento, è parzialmente influenzata dagli effetti del fuoco nel lungo termine, in quanto le aree a bassa severità hanno variazioni minori di riflettanza rispetto alle aree ad alta severità (White *et al.*, 1996). Infatti, relativamente alle classi di severità rilevate, la sola analisi dei dati telerilevati non permette di classificare i danni effettivamente subiti dalle cenosi forestali ecco perché a tale proposito la validazione dei risultati deve avvenire con specifici rilievi in campo (es. scheda CBI) (Key and Benson, 2005). Si può però ipotizzare che nelle classi di severità media ed elevata, gli incendi abbiano interessato le chiome, rispettivamente con scottature parziali o consumo totale di queste da parte del fuoco. Tali effetti sono stati in parte osservati dalle ortofoto disponibili negli anni successivi gli incendi.
Il rilievo della severità, a livello spaziale ha comunque mostrato un pattern di distribuzione molto variabile, poiché legato alle caratteristiche topografiche e morfologiche del sito, come

la presenza di impluvi, zone umide, oltre che alla distribuzione delle cenosi forestali la cui tipologia e densità hanno determinato la quantità di biomassa combustibile disponibile e di conseguenza la classe di severità risultante.

In generale, i rimboschimenti di conifere hanno evidenziato il maggior grado di severità e la maggior superficie percorsa da incendio rispetto alle altre categorie forestali. Questo risultato concorda con uno studio a livello nazionale nel quale, l'indice di infiammabilità più elevato tra le varie classi forestali individuate nella *Corine Land Cover*, è raggiunto appunto dalle pinete di tipo mediterraneo e oro-mediterraneo (Corona *et al.*, 2014) (Figura 74).

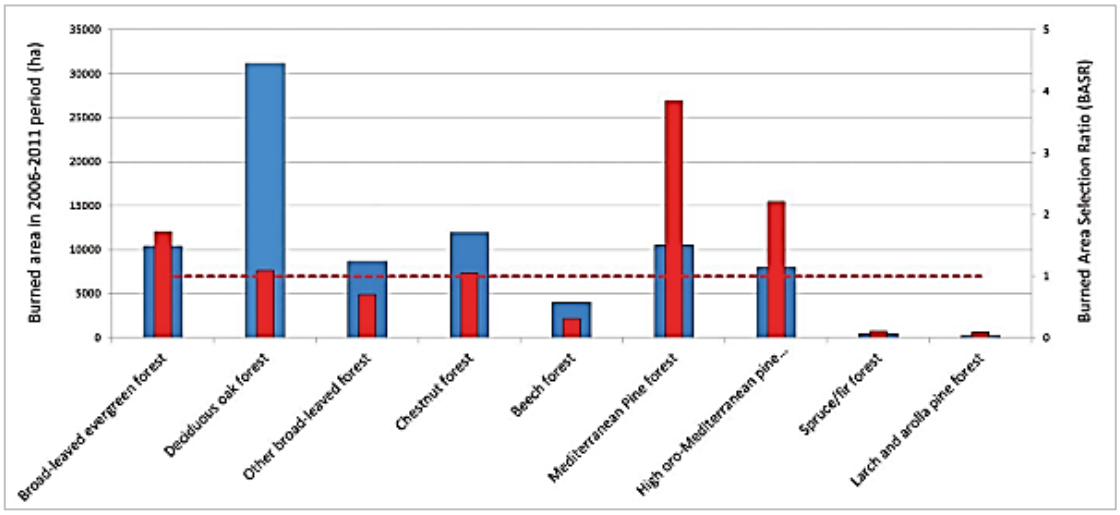


Figura 74: Indice di infiammabilità nelle diverse categorie forestali a livello nazionale (fonte: *Corona et al. 2014*)

Il confronto tra indici mostra un processo di ricolonizzazione della vegetazione lento e dominato ad oggi dalle comunità erbacee.

In bibliografia è stato osservato che le pinete a *Pinus nigra* e *Pinus sylvestris* sono caratterizzate da una rinnovazione scarsa in seguito ad incendi di chioma, in quanto non sono specie tipicamente pirofite con strobili serotini come per esempio *P. halepensis*. La scarsa resilienza ai disturbi evidenziata dai popolamenti di *Pinus nigra*, causa cambiamenti nel tipo di copertura vegetale presente dopo gli incendi, con conseguenze variabili che possono essere la trasformazione in praterie o in comunità vegetali dominate da latifoglie (Rodrigo *et al*., 2004).

Lo studio delle dinamiche di rinnovazione con gli indici di vegetazione consente un'analisi di tipo qualitativo sui processi di ricolonizzazione delle aree percorse dall'incendio. A tale proposito, il tasso di variazione dei valori medi degli indici all'interno delle superfici boscate

offre la possibilità di stimare la velocità di recupero delle comunità vegetali presenti prima dell'incendio.

In generale, alle Cesane, sebbene due anni sia un periodo molto limitato per valutare gli esiti di una successione post-incendio, si osserva una scarsissima resilienza da parte del pino nero, la cui strategia di rinnovazione gamica è generalmente più lenta di quella vegetativa tipica delle latifoglie degli ambienti mediterranei (Rodrigo *et al*. 2004).

Inoltre, come già ricordato gli strobili del pino nero non sono serotini e con il calore non hanno potuto aprirsi e diffondere il seme, ma sono in gran parte bruciati. La lettiera di aghi è bruciata così come le cortecce e il floema (la parte conducente del legno) di fusti e rami sono stati quasi interamente carbonizzati, risparmiando solo una parte dello xilema, ancora utilizzabile come legno energia. La rinnovazione di pino nero è quindi completamente assente ed è altamente improbabile che nel breve o medio termine una pineta possa in qualche modo ricostituirsi in situ a meno che non sia ripiantata. Peraltro la trasformazione di un soprassuolo da un popolamento monospecifico a una foresta mista in seguito al passaggio del fuoco è ampiamente documentata in letteratura (Van Gils *et al*., 2010) (Figura 75).

Figura 75: Un tratto della pineta delle Cesane subito dopo l'incendio del luglio 2017

Le formazioni a prevalenza di latifoglie se gli apparati radicali vengono risparmiati dal fuoco, hanno in genere una maggiore resilienza al passaggio del fuoco, grazie alla capacità pollonifera

delle ceppaie (Trabaud, 1994). Alle Cesane si osserva infatti che nei filari di orniello interposti a quelli di pino nero, o in corrispondenza di altri sporadici individui di latifoglie (soprattutto roverella) sebbene i polloni adulti siano stati ugualmente bruciati dal fuoco, nuovi ricacci basali sono stati osservati poche settimane dopo l'evento (Figura 76). Queste rinnovate ceppaie sono le uniche isole di rinnovazione nel processo di ri-vegetazione della zona incendiata.

Figura 76: Ricaccio vegetativo basale di orniello (*Fraxinus ornus*) poche settimane dopo l'incendio (foto 9-09-2017)

I valori di NDVI e NBR2 riflettono le condizioni vegetative delle fitocenosi che risultano legate anche a molteplici fattori come la presenza di suolo nudo che possono influenzare i valori di riflettanza soprattutto nella regione dell'infrarosso ad onda corta.

L'indice NDMI, più sensibile al contenuto di acqua nei tessuti vegetali, si è mostrato maggiormente influenzato dall'andamento climatico stagionale, come lo stress idrico del suolo in assenza di vegetazione e meno dagli effetti intrinseci del disturbo stesso.

L'indice NDVI invece, più capace di seguire la fenologia della specie, deve essere utilizzato in un intervallo temporale non troppo ampio affinché le variazione fenologiche non mascherino troppo l'effetto del disturbo (Chuvieco *et al.*, 2010; Smith, 2006).

La variabilità dei valori di NDVI consente una valutazione sia quantitativa della superficie danneggiata, sia qualitativa, in base alle superficie delle chiome rimaste fotosinteticamente attive.

Superfici maggiormente danneggiate avranno infatti una maggiore diminuzione del valore di NDVI che è negativamente correlato alla capacità rigenerativa della vegetazione (Díaz-Delgado *et al*., 2003).

Al variare delle condizioni della chioma e della presenza di clorofilla varierà il rapporto tra la riflettanza del rosso e dell'infrarosso, o dello SWIR1/SWIR2 restituendo una variazione degli indici NDVI e di NBR2.

L'utilizzo degli indici consente una valutazione sintetica del danno ecologico e fisiologico subito dalle fitocenosi l'incendio. Similmente a quanto già osservato nel confronto tra indici di vegetazione, è plausibile che il "rapido" aumento registrato dai valori degli indici (NDVI e NBR2), sia dovuto, già dopo il primo anno dal passaggio del fuoco, all'invasione delle comunità erbacee favorite dall'elevata disponibilità di luce ed alla loro capacità di adattarsi alle sostanze nutritive, contenute soprattutto nelle ceneri, visto che gli orizzonti organici del suolo sono stati anch'essi combusti dal fuoco.

Nelle zone percorse da incendio la diminuzione di riflettanza nella banda 8 (NIR) ed il corrispondente aumento nella banda 12 (SWIR-2) derivano principalmente dalla diminuzione della biomassa fotosintetizzante, la quale in condizioni normali ha un alto valore di riflettanza nella lunghezza d'onda del NIR ed un marcato assorbimento (basso valore di riflettanza) nella regione del SWIR, causato dall'acqua contenuta nei tessuti vegetali e nel suolo (Jensen, 2009).

Relativamente al terzo aspetto il sistema Kaarta Stencil si è rivelato l'unico sistema da noi testato in grado di fornire dati immediatamente dopo l'acquisizione e potrebbe essere in un prossimo futuro una rinnovata ed efficace alternativa ai tradizionali rilievi dendrometrici in campo, sempre con opportuna calibrazione dei dati raccolti. Questo primo utilizzo sperimentale in campo forestale ha incluso alcune criticità peraltro facilmente evitabili nei prossimi impieghi: i) il mancato utilizzo di marker catarifrangenti per georiferire direttamente la nuvola di punti dello strumento Kaarta per evitare un preliminare rilievo da drone (allungamento dei tempi di rilievo di circa 25 minuti) e minimali distorsioni nella restituzione del dato; ii) la sostituzione nel percorso di rilievo in bosco di una traiettoria a sinusoide con una a spirale uscente, onde evitare un accumulo di errore nella stima (Figura 77).

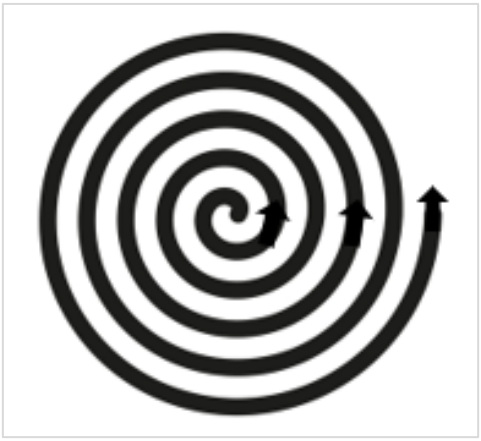


Figura 77: Traiettoria spirale uscente da utilizzare nel rilievo in campo con tecnologia SLAM

L'impiego di tecnologia SLAM non è inteso a sostituire il fondamentale ruolo dell'analisi esperta del professionista, poiché esistono molte situazioni articolate e di transizione difficilmente modellizzabili con l'applicazione di indici di derivazione algebrica tramite GIS o elaborazioni di nuvole di punti.

L'impiego di questa tecnologia, piuttosto, va visto nel senso della costruzione di un sistema di supporto alle decisioni, creando sinergie per migliorare la percezione e l'analisi dell'ambiente da pianificare, facilitando le attività di monitoraggio, soprattutto su aree vaste, dove "il rilievo tradizionale" ha tempistiche elevate.

Sicuramente, ci sarà la necessità in futuro, di ripetere il rilievo con tecnologia SLAM, seguendo delle opportune accortezze e confrontando i dati ottenuti dal rilievo Kaarta con un rilievo tradizionale ("verità a terra").

La ricerca in progress su hardware e implementazioni software di questo sistema automatico di classificazione del dato contribuirà a migliorare ulteriormente questo già efficiente sistema geomatico.

CONCLUSIONI

In questo studio è stato possibile valutare, quantificare ed analizzare l'impatto del fuoco sull'ecosistema ed iniziare a valutare la sua capacità di resilienza nella ricostituzione della copertura vegetale. Gli obbiettivi principali del presente studio erano:

- Mappare e classificare la severità dell'incendio boschivo analizzandone le caratteristiche in termini dimensionali e di impatto sulla vegetazione forestale attraverso l'utilizzo di indici per il rilievo dei cambiamenti spettrali in seguito ad un disturbo e l'analisi delle dinamiche di rinnovazione;
- Testare l'utilizzo dei veivoli APR per l'elaborazione di modelli digitali del terreno e l'estrazione di ortofoto;
- Testare l'utilizzo della tecnologia SLAM con strumentazione Kaarta Stencil-2 per la rapida stima dei danni al soprassuolo in seguito ad un disturbo.

Di assoluta importanza ai fini della perimetrazione dell'incendio e nelle classi di severità nonché dell'individuazione dei tipi forestali colpiti, sono le informazioni derivanti dalle immagini multispettrali. Queste costituiscono un primo passaggio nella caratterizzazione delle dinamiche ecologiche post-disturbo, le quali per una maggiore precisione, richiedono verifiche a terra per l'interpretazione dei valori ottenuti e per una corretta calibrazione degli indici rispetto ai parametri ecologici di interesse. In tal senso il telerilevamento applicato alle aree percorse da incendio costituisce uno strumento efficace per ottimizzare il metodo di campionamento a terra nonché nella determinazione della magnitudo di un incendio boschivo sul soprassuolo. In entrambi i casi è auspicabile la verifica dei dati in campo per verificarne la precisione, facilitare l'interpretazione dei valori ottenuti, e calibrarli nel rispetto dei parametri ecologici della zona d'interesse.

La scelta dei dati telerilevati è limitata dalla risoluzione spaziale, temporale e spettrale dei sensori. Il vantaggio dei dati Sentinel risiede nell'alta risoluzione spaziale, d'altro canto il dato Landsat offre una disponibilità di dati continuativa nel tempo da oltre quarant'anni.

In questo lavoro, l'utilizzo di un sistema accessibile come QGIS è stato di grande ausilio, sia per la produzione di immagini RGB, ma anche per l'estrazione delle variabili dendrometriche da immagini LiDAR.

Le moderne tecnologie Laser scanning, possono essere considerate valide alternative (ma ancora costose) al tradizionale rilevamento dendrometrico purchè ben calibrate alle esigenze di ogni particolare situazione.

In tal senso la tecnologia SLAM costituisce uno strumento molto promettente per ottimizzare il campionamento a terra, ed integrare i dati telerilevati, offrendo dati facilmente elaborabili e confrontabili, nonché informazioni anche sulla struttura verticale di un popolamento forestale. Confrontare dati LiDAR e dati ottici/multispettrali è un procedimento comunemente impiegato perché si tratta di due sistemi di acquisizione che forniscono informazioni molto diverse tra loro e quindi in grado di fornire congiuntamente una risposta più completa rispetto all'utilizzo separato di uno o dell'altro.

L'applicazione di queste tecniche per lo studio della severità degli incendi costituisce un valido strumento di supporto alla pianificazione di interventi volti al ripristino delle coperture forestali alterate, il cui mantenimento assume un'importanza centrale, in relazione ai servizi ecosistemici forniti. È quindi necessario, maturare la consapevolezza dell'utilità e delle funzioni svolte dai sistemi forestali, tenendo in considerazione il valore economico totale del bosco e delle foreste e di tutti gli effetti causati dagli incendi, al fine di proporre misure di contenimento del degrado del suolo, ma anche del deterioramento ambientale.

BIBLIOGRAFIA

Addabbo, P. *et al.* (2016) 'Contribution of Sentinel-2 data for applications in vegetation monitoring', *Acta IMEKO*, 5(2), pp. 44–54. doi: 10.21014/acta_imeko.v5i2.352.

Agisoft Photoscan (2011) 'Agisoft PhotoScan Manuale d ' uso', La fotomod.

Agostino, M. De *et al.* (2010) 'Problemi e soluzioni legati all ' impiego di sensori GNSS ed INS di basso costo per la navigazione geodetica', pp. 793–798.

Arlunno, R. (2018) 'Ambiente ed energia', *Annuario statistico Italiano 2018*, pp. 85–119.

Barilotti, A. (2010) 'Seminario " La tecnologia LiDAR per il settore forestale forestale " "', pp. 1–15.

Battipaglia, G. *et al.* (2017) 'Forest fires in 2017: a useful lesson', *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale*, 14(4), pp. 231–236. doi: 10.3832/efor0076-014.

Bauwens, S. *et al.* (2016) 'Forest Inventory with Terrestrial LiDAR : A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning'. doi: 10.3390/f7060127.

Bonacina, C. *et al.* (2007) *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner Volume 1 – Introduzione generale A cura di Matteo Sgrenzaroli e Giorgio P . M . Vassena*.

Bovio, G. *et al.* (2017) 'Forest fires are changing: let's change the fire management strategy', *Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale*, 14(4), pp. 202–205. doi: 10.3832/efor2537-014.

Bronzino, G. P. C. *et al.* (2019) 'Laser-Visual-Inertial Odometry Based Solution for 3D Heritage Modeling: the Sanctuary of the Blessed Virgin of Trompone', *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-2/W15(September), pp. 215–222. doi: 10.5194/isprs-archives-xlii-2-w15-215-2019.

Brivio, P. A., Lechi, G. & Zilioli, E., 2006. *Principi e metodi di Telerilevamento.* Torino: CittàStudi.

Brutti, E. (2017) *Incendi forestali nelle Marche : effetti sul territorio fra cambiamenti climatici e organizzativi*.

Cannarozzo; and Meschieri;, C. (2012) 'Principi e strumenti della fotogrammetria', *Zanichelli*, pp. 1–33.

Cannarozzo, Cucchiarini, M. and ; et (2012) 'Principi e strumenti della fotogrammetria: orientamento e restituzione T3', *Zanichelli*, pp. 67–96.

Chu, T. and Guo, X. et al. (2013) 'Remote sensing techniques in monitoring post-fire effects and patterns of forest recovery in boreal forest regions: A review', *Remote Sensing*, 6(1), pp. 470–520. doi: 10.3390/rs6010470.

Chuvieco, E. *et al.* (2010) 'Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies', *Ecological Modelling*, 221(1), pp. 46–58. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017.

Corona, P. *et al.* (2014) 'Calibration assessment of forest flammability potential in Italy', *IForest*, 7(5), pp. 300–305. doi: 10.3832/ifor1123-007.

Díaz-Delgado, R., Lloret, F. and Pons, X. (2003) 'Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery', *International Journal of Remote Sensing*, 24(8), pp. 1751–1763. doi: 10.1080/01431160210144732.

EFFIS (2018) *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2017 2018*.

Fichera (2016) 'Rilievo e rappresentazione del territorio'.

Floris, A. *et al.* (2012) 'Stima di volumi legnosi forestali con dati fotogrammetrici telerilevati da UAV su piccole superfici: un caso di studio in Trentino', *Fe.Infn.It*, (April), pp. 681–688. Available at: http://www.fe.infn.it/u/mantovani/Emanuele/Floris_12.pdf.

Gandhi, G. M. *et al.* (2015) 'Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis - A Case Study of Vellore District', *Procedia Computer Science*. Elsevier Masson SAS, 57, pp. 1199–1210. doi: 10.1016/j.procs.2015.07.415.

Giannetti, F. (2017) *3D Remote Sensing technologies for Precision Forestry*.

van Gils, H., Odoi, J. O. and Andrisano, T. (2010) 'From monospecific to mixed forest after fire?. An early forecast for the montane belt of Majella, Italy', *Forest Ecology and Management*, 259(3), pp. 433–439. doi: 10.1016/j.foreco.2009.10.040.

Hislop, S. *et al.* (2018) 'Using landsat spectral indices in time-series to assess wildfire disturbance and recovery', *Remote Sensing*, 10(3), pp. 1–17. doi: 10.3390/rs10030460.

Jensen, J. R. (2009) 'Remote Sensing of Vegetazione', pp. 1–33. Available at: papers2://publication/uuid/426999F5-CE84-427A-A204-0EBFBEEC708B.

Jiang, Z. *et al.* (2006) 'Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction', *Remote Sensing of Environment*, 101(3), pp. 366–378. doi: 10.1016/j.rse.2006.01.003.

Key, C. H. and Benson, N. C. (2005) 'Landscape assessment: ground measure of severity, the composite burn index, and remote sensing of severity, the normalized burn index. In: Lutes, D., Keane, R., Caratti, J., Key, C., Benson, N., Sutherland, S., Gangi, L. (Eds.)', *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System, Rocky Mountains Research Station,USDA Forest Service: Fort Collins, CO, USA, pp. 1– 51.*, pp. 1–55. doi: 10.1002/app.1994.070541203.

Legambiente (2006) 'Dossier Incendi E Legalita '.

Legambiente (2017) 'DOSSIER INCENDI 2017'.

Lehtola, V. V *et al.* (2017) 'Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods', *Remote Sensing*, pp. 1–26. doi: 10.3390/rs9080796.

Liang, X. *et al.* (2016) 'Terrestrial laser scanning in forest inventories', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS), 115, pp. 63–77. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006.

Mandanici, E. (2011) ‘Ingegneria Geomatica e dei Trasporti’.

Marcolin, E. *et al.* (2011) ‘Influenza della severità del fuoco sulle dinamiche di ricostituzione post-incendio : analisi multitemporale di immagini multispettrali’, pp. 1489–1498.

Michetti, M. and Pinar, M. (2013) ‘Forest fires in Italy: An econometric analysis of major driving factors’, *CMCC Research Paper*, (RP0152). Available at: http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2332068.

Miller, J. D. and Thode, A. E. (2007) ‘Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR)’, *Remote Sensing of Environment*, 109(1), pp. 66–80. doi: 10.1016/j.rse.2006.12.006.

Morresi, D. *et al.* (2019) ‘Forest spectral recovery and regeneration dynamics in stand-replacing wildfires of central Apennines derived from Landsat time series’, *Remote Sensing*, 11(3). doi: 10.3390/rs11030308.

Neary, D. G. ., Ryan, K. C. . and DeBano, L. F. (2005) ‘Wildland Fire in Ecosystems’, *Rocky Mountain Research Sation General Technical Rport*, 4(RMRS-GTR-42), p. 250. doi: http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-7717.2009.01106.x.

Pausas, J. G. *et al.* (1999) ‘2 The role of fire in European Mediterranean Ecosystems’, pp. 3–16.

Piao, S. *et al.* (2003) ‘Interannual variations of monthly and seasonal normalized difference vegetation index (NDVI) in China from 1982 to 1999’, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 108(14), pp. 1–13. doi: 10.1029/2002jd002848.

Pirotti, F. *et al.* (2013) *LiDAR full-waveform e immagini digitali ad alta risoluzione a supporto alla pianificaz ione forestale : un ’ applicazione nell ’ ambito del progetto NEWFOR*, *Atti 17a Conferenza Nazionale ASITA 2013*.

Raymond Hunt, E. et. al, Rock, B. N. and Nobel, P. S. (1987) ‘Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance’, *Remote Sensing of Environment*, 22(3), pp. 429–435. doi: 10.1016/0034-4257(87)90094-0.

Rete Rurale Nazionale, (RRN 2014-2020) (2018) *RaF Italia 2017-2018 - Rapporto sullo stato delle Foreste e del settore forestale in Italia*.

Richards, J. A. and Jia, X. et al (2006) *[John_A._Richards,_Xiuping_Jia]_Remote_Sensing_Dig(BookFi)*. doi: 10.1007/3-540-29711-1.

Rodrigo, A., Retana, J. and Picó, F. X. (2004) ‘Direct regeneration is not the only response of Mediterranean forests to large fires’, *Ecology*, 85(3), pp. 716–729. doi: 10.1890/02-0492.

Roy, D. P., Boschetti, L. and Trigg, S. N. (2006) ‘Remote Sensing Measure of Severity, the Normalized Burn Ratio’, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(1), pp. 112–116. doi: 10.2737/RMRS-GTR-164.

Smith, A. M. S. (2006) ‘Remote sensing techniques to assess active fire and post fire effects: clarification of terminology’, *International Journal of Wildland Fire*, 15(April), pp. 319–345.

Sysdeco (2007) *E-cognition per la gestione degli incendi boschivi*.

Tang, J. *et al.* (2015) 'SLAM-Aided Stem Mapping for Forest Inventory with Small-Footprint Mobile LiDAR', pp. 4588–4606. doi: 10.3390/f6124390.

Tang, L. and Shao, G. (2015) 'Drone remote sensing for forestry research and practices', *Journal of Forestry Research*. Northeast Forestry University, 26(4), pp. 791–797. doi: 10.1007/s11676-015-0088-y.

Trabaud Prodon, R, L. (1993) *Fire in Mediterranean ecosystems*, *Ecosystems Research Report Vol. 5. CEC, Bruxelles*.

Trabaud, L. (1994) 'Postfire Plant Community Dynamics in the Mediterranean Basin', pp. 1–15. doi: 10.1007/978-1-4613-8395-6_1.

Turner, M. G. and Gardner, R. H. (2015) *Landscape ecology in theory and practice: Pattern and process, second edition*, *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*. doi: 10.1007/978-1-4939-2794-4.

Unipi (2016) 'Geolocalizzazione di veicoli con sistema elettronico GPS differenziale e piattaforma inerziale', *Università degli studi di Pisa*.

Verma, M. *et al.* (2012) 'A Comparative Study of Various Clustering Algorithms in Data Mining', *International Journal of Engineering Research and Applications www.ijera.com*, 2(3), pp. 1379–1384.

White, J. D. *et al.* (1996) 'Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery', *International Journal of Wildland Fire*, 6(3), pp. 125–136. doi: 10.1071/WF9960125.

SITOGRAFIA

Agricolus, s.d.
https://www.agricolus.com/indici-vegetazione-ndvi-ndmi-istruzioni-luso/

Altobelli, A., 2018. *Università degli studi di Trieste.*

Anon., s.d. *Mindat.*
https://www.mindat.org/loc-244756.html

CGT, s.d. *Centro di GeoTecnologie.*
http://www.geotecnologie.unisi.it/corsinew.php?act=det&wat=1&id=345

Ciceri, M., 2014.
https://www.ideegreen.it/tecnologia-lidar-39640.html

Dessena, M. A. & Melis, M. T., 2006. *Telerilevamento applicato.* s.l.:Mako.

Favero, F. R. D., Lingua, E. & Pividori, M., 2019. Selvicoltura per la protezione dei disturbi. In: s.l.:Compagnia delle Foreste, pp. 8-17.

Gomarasca, M., 2000. *Elementi di Geomatica.* s.l.:Associazione Italiana di Telerilevamento AIT.

INFC, 2017. Available at: https://www.sian.it/inventarioforestale/jsp/01tabelle_superficie.jsp

Institute for remote sensing of environmente,
http://www.asita.it/content/uploads/2017/08/stroppiana_20150928_parte1_concetti_base.pdf

Knowledge portal, 2019.
http://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio

Life, 2019. *Making good Natura.*
http://www.lifemgn-serviziecosistemici.eu/IT/progetto/Pages/se.aspx

Michetti et al., &. M. P., 2013. *Forest Fires in Italy: An econometric analysis of major driving factors.,* Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici.

MicroGeo, s.d.
https://www.microgeo.it/it/prodotti-e-soluzioni/fotogrammetria/201586-software.aspx

Osservatorio Meteorologico “Alessandro Serpieri”
https://ossmeteo.uniurb.it/

Paciello, R., 2015. *ResearchGate.*
https://www.researchgate.net/figure/Figura-11-Unimmagine-multispettrale-ripresa-con-strumenti-digitali-corrisponde-a-k_fig1_291339903

Provincia di Pesaro Urbino,
http://www.provincia.pu.it/funghi/funghi-ipogei/foresta-demaniale-regionale-le-cesane-riserva-tartufaia-controllata/

Umbria Geo, 2013
http://www.umbriageo.regione.umbria.it/pagine/tecniche-di-posizionamento-gnss

Valle del Metauro, 2006. *Valle del Metauro.*
http://www.lavalledelmetauro.it/contenuti/beni-ambientali/scheda/4013.html

Wikipedia.png, 2012. Available at: https://it.wikipedia.org/wiki/File:Spettro_elettromagnetico.png

ALLEGATO 1

Parametri utilizzati per Elaborazioni

DTM	30x30 Active layer: height grid values direction: z cell height: average fill with: interpolate
Buffer	distanza: 3 m segmenti: 5
Cluster	dimensione minima: 100 punti massima distanza tra punti dello stesso cluster: 20 cm
1-Filtro	dev.stand/media ≥ 0,333 (dev.stand ≥ $^1/_3$ media)
2-Filtro	[media - dev.stand.*1,5] ≥ lunghezza oppure [media + dev.stand.*1,5] ≤ lunghezza