

Telerilevamento e procedure automatiche: validi strumenti di supporto al monitoraggio delle utilizzazioni forestali

Saverio Francini⁽¹⁻²⁻³⁾,
Giovanni D'Amico⁽¹⁾,
Marco Mencucci⁽⁴⁾,
Giovanni Seri⁽⁵⁾,
Elisabetta Gravano⁽⁶⁾,
Gherardo Chirici⁽¹⁾

Remote sensing and automatic procedures: useful tools to monitor forest harvesting

Forests produce a wide range of ecosystem services, including the traditional wood production. Sustainable forest management approaches are used to locally calibrate wood harvesting on the basis of local conditions and should not adversely affect other ecosystem services. To assess forest harvesting sustainability and impacts it is essential to know their spatial distribution. At the present date accurate statistics on wood harvesting are not available in Italy. In this context, remote sensing and automatic mapping algorithms constitute an important tool for providing spatially explicit information to quantify wood harvesting and thus supporting more sustainable forest management approaches. In this work we tested an automatic mapping algorithm (3I3D) using multitemporal Sentinel-2 imagery to produce a map of forest disturbance produced by different types of wood harvesting in the province of Arezzo for the year 2018. Thanks to a photo-interpretation work of high resolution PlanetScope imagery and field data collected by the Carabinieri Forestali, we were able to calculate commission (2%) and omission (18%) errors of the automatic 3I3D map. The results of this work motivate the introduction of remote sensing tools as a support for monitoring and quantification of forest wood harvesting.

Keywords: Remote Sensing, Sentinel-2, Forest Disturbance, Harvest, PlanetScope

Introduzione

Il monitoraggio annuale delle utilizzazioni forestali a scala nazionale è un'operazione complessa che nel tempo è stata affrontata con metodologie anche molto diverse fra loro. Storicamente, l'ISTAT (Istituto Nazionale di Statistica) si è avvalso di un approccio censuario basato sui dati amministrativi provenienti dalle procedure autorizzative propedeutiche alle operazioni di taglio. Tali procedure sono determinate dalle regioni o dalle province auto-

me (hanno normalmente il carattere di "dichiarazioni alle" o di "autorizzazioni da parte delle" autorità competenti) e consentono di ottenere una valutazione quantitativa delle superfici sottoposte a taglio nonché della quantità di massa prelevata. Tale approccio ha presentato nel tempo delle criticità sia di tipo organizzativo nella raccolta dati da parte di enti diversi (Regioni, Province autonome e stazioni dell'ex Corpo Forestale dello Stato) che strutturale per l'effettiva capacità di cogliere la completezza del fenomeno sulla base dei soli dati amministrativi. Questi dati, a causa delle difformità tra le norme regionali per il rilascio delle autorizzazioni al taglio (*in primis*, il limite minimo per l'obbligatorietà della richiesta che differisce tra le diverse Regioni) o per l'inclusione dell'arboricoltura da legno tra le utilizzazioni legnose in foresta, talvolta non risultavano coerenti (Marongiu & Gismondi 2018) e i controlli sugli effettivi prelievi erano insufficienti, anche per motivi logistici e per i limitati budget disponibili per tali rilevazioni (Corona et al. 2007, Pilli 2011). Soprattutto però i dati forniti risultavano sottostimare fortemente sia le effettive utilizzazioni boschive rilevate in occasioni diverse (Pilli 2011) e, per quanto riguarda specificatamente la legna da ardere, non in grado di spiegare la discrepanza con le stime dei consumi delle famiglie (ISTAT 2014). Per i motivi sopra esposti, nel 2015 ISTAT ha sospeso la pubblicazione di statistiche riguardanti i prelievi legnosi.

Una fonte di dati ufficiali per la stima delle utilizzazioni forestali in Italia è l'indagine campionaria eseguita nell'ambito dell'Inventario Forestale Nazionale (Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi forestali di Carbonio – INFC). Tale indagine costituisce uno strumento fondamentale per conoscere la consistenza delle risorse forestali di un Paese e le sue variazioni nel tempo attraverso

□ (1) Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agrarie, Alimentari, Ambientali e Forestali, Università degli Studi di Firenze. v. San Bonaventura, 13, 50145 Firenze (Italy); (2) Dipartimento di Bioscienze e Territorio, Università degli Studi del Molise, c.da Fonte Lappone, 86090 Pesche, IS (Italy); (3) Dipartimento per l'Innovazione dei sistemi Biologici, Agroalimentari e Forestali, Università degli Studi della Tuscia, v. San Camillo de Lellis, 01100 Viterbo (Italy); (4) Reparto Carabinieri Parco Nazionale Foreste Casentinesi, Arezzo (Italy); (5) Istituto Nazionale Di Statistica, Via C. Balbo 16, Roma (Italy); (6) Regione Toscana, Firenze (Italy)

@ Giovanni D'Amico (giovanni.damico@unifi.it)

Ricevuto: Apr 02, 2021 - Accettato: Apr 26, 2021

Citazione: Francini S, D'Amico G, Mencucci M, Seri G, Gravano E, Chirici G (2021). Telerilevamento e procedure automatiche: validi strumenti di supporto al monitoraggio delle utilizzazioni forestali. *Forest@* 18: 27-34. - doi: [10.3832/efor3835-018](https://doi.org/10.3832/efor3835-018) [online 2021-05-07]

aggiornamenti periodici. Data la complessità dei rilievi da effettuare in tutto il territorio nazionale, i dati inventariali sono tipicamente aggiornati ogni 10 anni (INFC 2007). Inoltre, nell'ambito dell'Inventario Forestale Nazionale, vengono ottenute statistiche aggregate a livello regionale o nazionale, ma non vengono prodotte mappe e la posizione delle tagliate resta ignota.

Il più recente tentativo di aggregazione a scala nazionale di dati locali sulle utilizzazioni forestali è quello del 1° Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia (RaF Italia - MIPAAF 2019). Anche in questo documento, con dati riportati in forma tabellare, si evidenziano delle criticità nell'acquisizione delle informazioni riguardanti le pratiche selvicolturali. Primo, l'incompletezza del database dovuto alla mancata fornitura di dati da parte di alcune Regioni. Secondo, le superfici riportate si riferiscono alle pratiche amministrative necessarie per l'attuazione degli interventi selvicolturali. Terzo, i dati presentati rilevano superfici non necessariamente utilizzate nell'anno dell'autorizzazione o comunicazione/dichiarazione, poiché tali pratiche in molti casi hanno validità pluriennale.

Esempio virtuoso per la costante attività di monitoraggio del patrimonio forestale è la Toscana che, assieme a Lombardia, Liguria, Provincia Autonoma di Trento, Provincia Autonoma di Bolzano e Sicilia, pubblica periodicamente il Rapporto sullo Stato delle Foreste. L'ultima versione (Regione Toscana 2019), in cui sono riportati i dati forestali per il triennio 2017-2019, quantifica le utilizzazioni forestali sia in proprietà pubbliche sia private. Tuttavia, anche in questo caso, i dati sono riportati sulla base delle richieste di intervento e non sulle reali utilizzazioni effettuate. Le medesime criticità vengono riscontrate nei dati forniti dal Sistema Informativo per la Gestione delle Attività Forestali (SIGAF) della Regione Toscana, il quale fornisce un file vettoriale relativo alle richieste di intervento pervenute nel triennio 2017-2019.

In questo contesto il telerilevamento è uno strumento particolarmente efficace in quanto permette di individuare e quantificare la superficie delle utilizzazioni forestali. In effetti, è già stato dimostrato che i disturbi forestali quali tagliate, incendi, schianti e disseccamenti, sono in larga parte visibili dalle immagini telerilevate (Chirici et al. 2011) e possono essere individuati e mappati utilizzando

procedure automatiche (Kennedy et al. 2010, Hermosilla et al. 2016, Chirici et al. 2020, Francini et al. 2020, Giannetti et al. 2020). L'avanzamento tecnologico ha inoltre aumentato la potenza di calcolo ed algoritmi sempre più complessi possono essere implementati ed applicati in aree sempre più grandi e in tempi sempre più brevi (White et al. 2014).

Le prime procedure messe a punto per la mappatura automatica dei disturbi sono state ottimizzate per le caratteristiche delle foreste boreali (Hermosilla et al. 2016), ma si sono dimostrate poco efficaci negli ecosistemi italiani (Giannetti et al. 2020). La loro inefficacia in Italia è dovuta alla rapida ripresa vegetativa che caratterizza i boschi cedui e alla ridotta dimensione delle tagliate (Chirici et al. 2020). Per questo motivo è stato sviluppato un nuovo algoritmo *3-Indices-3-Dimensions* (3I3D - Francini et al. 2021) il quale, nel contesto italiano, si è dimostrato più accurato di analoghi approcci sviluppati e ottimizzati per applicazioni globali quali la *Global Forest Change Map* (Hansen et al. 2013) e le applicazioni basate su *Landtrendr* (Kennedy et al. 2018), o di precedenti approcci sviluppati in Italia come l'algoritmo *Two Thresholds Method* (TTM - Giannetti et al. 2020). Vista l'importanza di fornire statistiche affidabili sulle utilizzazioni forestali e di produrre mappe accurate della loro posizione, e vista la mancanza di un dato ufficiale in Italia, questo lavoro si pone l'obiettivo di testare il metodo 3I3D come strumento di supporto al monitoraggio delle utilizzazioni forestali. L'area di studio consiste nell'intera provincia di Arezzo (3233 km² o 32 330 pixel Sentinel-2) nella quale abbiamo mappato le tagliate eseguite nel periodo compreso tra agosto 2017 e agosto 2018.

Materiali

Area di Studio

L'indagine è stata eseguita in Provincia di Arezzo, situata nella zona orientale della Regione Toscana, confinante con le Regioni Emilia-Romagna, Marche e Umbria, oltre alle Province di Firenze e Siena (Fig. 1). L'intera Provincia ha una superficie di 3233 km² ed è interessata dalla dorsale appenninica, con rilievi fino a 1654 m s.l.m. in Casentino. Morfologicamente il territorio è diviso in cinque vallate: la piana di Arezzo, comprendente il capoluogo ed il territorio circostante; il Casentino, che corrisponde al tratto superiore del fiume Arno, compreso tra i massicci dell'Alpe di Catenia ad est e del Pratomagno ad ovest; il Valdarno Superiore, vallata alluvionale in cui l'Arno scorre tra il versante ovest del Pratomagno e i monti del Chianti; la Valdichiana, a sud ovest della piana di Arezzo; la Valtiberina, tra l'Alpe della Luna ad est e l'Alpe di Catenia ad ovest, dove scorre il fiume Tevere. Dal punto di vista forestale, l'area boschiva complessiva risulta di 1920 km² con predominanza di latifoglie (87%). I soprassuoli maggiormente rappresentati sono i querceti di roverella (27%), le cerrete (23%), i castagneti (13%) e le faggete (10% - Arrigoni et al. 1999).

Immagini Sentinel-2

A partire dal 2015 è operativa la missione Sentinel-2 del programma di telerilevamento Copernicus, guidato dalla Commissione europea in collaborazione con l'Agenzia Spaziale Europea (European Space Agency, ESA). La missio-

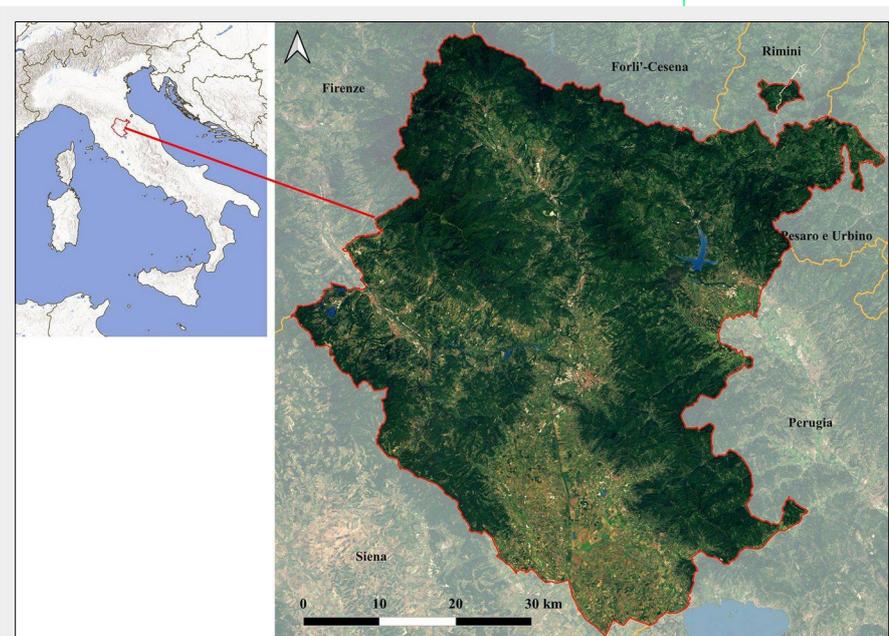


Fig. 1 - Area di studio.

ne Sentinel-2 specificatamente sviluppata per il monitoraggio in alta risoluzione del territorio, è composta da due satelliti gemelli (Sentinel-2A e Sentinel-2B) con orbita polare e con un tempo di rivisitazione di 3-5 giorni. I satelliti sono muniti del sensore MSI (*MultiSpectral Instrument*) che fornisce immagini con 13 bande spettrali, con risoluzione spaziale compresa tra 10 e 60 metri (Drusch et al. 2012).

Il completo archivio delle immagini Sentinel-2 è disponibile su *Google Earth Engine™* (GEE – Gorelick et al. 2017), così come una dettagliata descrizione del dato e delle caratteristiche delle immagini (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2). GEE è una piattaforma web (<https://earthengine.google.com/>) che permette di elaborare in *cloud* enormi moli di dati utilizzando codici in linguaggio JavaScript, senza necessità di scaricare prodotti intermedi.

Selezione delle immagini e preelaborazione

In questo lavoro, utilizzando GEE, abbiamo selezionato tutte le immagini Sentinel-2 acquisite per la provincia di Arezzo negli anni 2017, 2018 e 2019 nel periodo compreso fra il primo giorno di giugno e l'ultimo giorno di agosto e con una copertura nuvolosa inferiore al 40%. Attraverso la banda QA60 sono state eliminate le aree coperte da nuvole e cirri. Per maggiori informazioni su questa maschera e su come viene calcolata si fa riferimento alla guida tecnica fornita da ESA (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/level-1c/cloud-masks>).

Per ognuno dei tre anni si è infine ottenuto un mosaico privo di nuvole calcolando per ogni *pixel* la mediana fra tutte le osservazioni disponibili. Queste tre immagini saranno utilizzate come *input* dall'algoritmo per l'identificazione automatica dei disturbi.

Immagini Planet

Per le successive fasi di validazione del risultato di mappatura automatica delle tagliate, ci siamo serviti di immagini PlanetScope RGB, gratuitamente accessibili in rete. PlanetScope è una missione costituita da una costellazione di nano satelliti in costante aumento (ad oggi oltre 150), che forniscono immagini con una risoluzione spaziale di 3,7 metri ed un tempo di rivisitazione di un giorno (Francini et al. 2020).

Sulla base delle immagini Planet abbiamo realizzato tre immagini estive, una per l'anno di indagine (2018), una per l'anno precedente (2017) e una per il successivo (2019). Per selezionare automaticamente le immagini migliori e non coperte da nuvole abbiamo diviso l'area di studio in 6242 *tiles* (quadranti) di 1 km di lato e, per ogni anno e per ogni *tile*, abbiamo selezionato l'immagine con minore copertura nuvolosa fra quelle acquisite nel periodo 15 giugno - 30 agosto. Il risultato è il mosaico costituito dai 6242 migliori *tile* selezionati automaticamente.

Immagini ad altissima risoluzione

Come supporto per la validazione del risultato di mappatura, abbiamo fatto ricorso anche ad immagini ad altissima risoluzione. In particolare, abbiamo utilizzato le ortofoto AGEA acquisite per gli anni 2016 e 2019 con risoluzione di 20 cm, gratuitamente disponibili per tutto il territorio della Regione Toscana (servizio WMS – <https://www.regione.toscana.it/servizi-wms>). Infine, abbiamo utilizzato le immagini *Google Satellite* servendoci del software *Google Earth™* (<https://www.google.it/earth/>).

Dataset di validazione

A partire dalle immagini Sentinel-2, PlanetScope e le ortofoto ad altissima risoluzione, tramite fotointerpretazione, è stata prodotta una mappatura delle utilizzazioni in Provincia di Arezzo per il 2018. Le aree risultate dubbie in

fase di fotointerpretazione sono state visitate sul campo, così da poter considerare il risultante dataset di validazione come privo di errori. Abbiamo identificato complessivamente 1840 ha di utilizzazioni. Questo database è stato utilizzato per validare la procedura 3D calcolandone la performance.

Inoltre, per eseguire una valutazione sia di tipo qualitativo (tipo di intervento forestale, specie prevalenti), che quantitativo (superficie, rilascio di matricine per i cedui, ecc.) abbiamo fatto ricorso a dati rilevati in campo dai Carabinieri Forestali – Gruppo di Arezzo (CCF), disponibili per 376 utilizzazioni. Questo database riporta per ogni intervento gli ettari interessati, l'età del soprassuolo, la specie principale, il numero di matricine residue per interventi sui cedui e il tipo di intervento (diradamento o taglio raso) per le fustaie.

Dei 376 interventi censiti, il 90% sono ceduazioni (337), con un rilascio medio di 90 matricine ad ettaro. La superficie media ad intervento risulta di 2 ha per complessivi 771 ha. Per le fustaie sono stati rilevati 22 diradamenti (6%) con una superficie media di 2 ha e 15 tagli rasi in media di 1,3 ha. Risultano inoltre due interventi in boschi di neoforestazione, rispettivamente un diradamento e un taglio raso, entrambi con superficie inferiore all'ettaro.

Dataset SIGAF

Presso il SIGAF della Regione Toscana è disponibile uno strato informativo (*layer*) relativo alle utilizzazioni forestali in formato vettoriale. Tale *layer* non rappresenta la sorgente delle informazioni ufficiali riportate nel RaFT ma rappresenta l'unico dataset geografico disponibile ed abbiamo perciò ritenuto rilevante esaminare tali superfici e confrontarle con quelle individuate dal nostro algoritmo.

Il dataset è disponibile con poligoni riferiti ai tre anni di aggiornamento del RaFT (2017, 2018 e 2019) fra i quali abbiamo selezionato gli interventi selvicolturali ricadenti nell'area di studio (provincia di Arezzo) per il solo anno di indagine (2018). Il dataset così ottenuto consta di 1686 interventi, per complessivi 2939 ha utilizzati. In termini di superficie il risultato risulta in linea con i dati dal RaFT che, per il 2019, unico anno con dati disponibili a livello provinciale, riporta per la Provincia di Arezzo 2628 ha (Regione Toscana 2019).

Metodo

Mappatura automatica dei disturbi forestali

Three Indices Three Dimensions (3I3D) è un algoritmo non supervisionato che, senza richiedere parametri di *input* o calibrazioni, permette di identificare i cambiamenti forestali (come tagliate, incendi e danni da patogeni o altri disturbi naturali come vento, siccità o gelate). Per una dettagliata descrizione dell'algoritmo si rimanda a Francini et al. (2021), qui di seguito si riporta brevemente il concetto generale che sta alla base del funzionamento di 3I3D.

L'algoritmo 3I3D analizza l'andamento in tre anni consecutivi di tre indici di attività fotosintetica (3I) utilizzati come assi di uno spazio tridimensionale (3D). I tre indici sono stati selezionati tra quelli considerati in letteratura come i più utili per la individuazione dei disturbi forestali (Hermosilla et al. 2016, Kennedy et al. 2018): (i) *Normalized Difference Moisture* (NDMI); (ii) *Normalized Burn Ratio* (NBR); e (iii) *Moisture Stress Index* (MSI). I tre indici sono stati calcolati a partire dalle immagini Sentinel-2 utilizzando le bande 8 (b8), alla risoluzione spaziale di 10 metri, e le bande 11 (b11) e 12 (b12) riclassificate a 10 m dai 20 m originali (eqn. 1, eqn. 2, eqn.3):

$$NDMI = \frac{b8 - b11}{b8 + b11} \quad (1)$$

Tab. 1 - Matrice di confusione, *producer accuracy* (PA), *user accuracy* (UA) e stima della superficie delle tagliate di 313D espressi in ettari. Fra parentesi è indicato lo scostamento rispetto alla reale superficie (1841 ha).

Confronto	313D		PA	UA	Tagliate 313D
	Tagliata	Altro			
Mappa verità	Tagliata	Veri-positivi 1516	82	98	1549 (-292)
	Altro	Falsi-positivi 33			

$$NBR = \frac{b8 - b12}{b8 + b12} \quad (2)$$

$$MSI = \frac{b11}{b8} \quad (3)$$

L'algorithmo 313D analizza indipendentemente ogni pixel dell'immagine. L'analisi avviene nello spazio tridimensionale formato dai tre indici e descrive l'andamento dell'attività fotosintetica in tre anni consecutivi: (i) l'anno precedente t_{-1} ; (ii) l'anno in cui vengono rilevati i cambiamenti t ; e (iii) l'anno successivo t_{+1} . La variazione complessiva che si verifica nei tre indici tra due anni può essere misurata calcolando la distanza tra due punti, mentre la relazione tra i cambiamenti può essere misurata calcolando gli angoli ϕ (ϕ) e θ (θ) dei vettori che collegano i punti t e t_{-1} e i punti t e t_{+1} . Sulla base di questo concetto, 313D calcola cinque indici multitemporali di attività fotosintetica (PMI) che descrivono l'andamento nei tre anni dei tre indici. Quattro dei cinque PMI sono costituiti dagli angoli θ e ϕ calcolati per i due vettori che collegano rispettivamente i punti t_{-1} e t e i punti t e t_{+1} . L'ultima PMI (*Multitemporal Magnitude*, MM) misura la variazione complessiva ed è calcolata come la somma delle lunghezze dei due vettori. Come ultimo passaggio, l'algorithmo calcola un'immagine di probabilità (PI), che, tramite un'analisi multicriteriale di tipo fuzzy, esprime il grado con cui i valori PMI sono simili a quelli per i pixel disturbati. La mappa finale dei disturbi forestali con un'unità minima cartografabile di 0.1 ha (10 pixel Sentinel-2) viene costruita rimuovendo i pixel con una PI inferiore al 90% ed eliminando, tramite la maschera del bosco disponibile a scala nazionale (D'Amico et al. 2021), eventuali cambiamenti identificati in aree non boscate.

Calcolo dell'accuratezza

Il confronto tra la mappa ottenuta automaticamente tramite l'algorithmo 313D e quella di verità è stato eseguito utilizzando una matrice di confusione che ci ha permesso di calcolare, per ognuna delle due mappe, la superficie degli errori di omissione e di commissione presenti. Per valutare in maniera esaustiva l'accuratezza di entrambe le mappe, abbiamo calcolato due parametri statistici: (i) *Producer Accuracy* (PA - eqn. 4) e (ii) *User Accuracy* (UA - eqn. 5).

$$PA = \frac{VP}{VP + FN} \quad (4)$$

$$UA = \frac{VP}{VP + FP} \quad (5)$$

dove VP (veri-positivi) corrisponde al numero di pixel identificati correttamente come tagliate, FP (falsi-positivi) corrisponde al numero di pixel identificati come tagliate ma che sono invece foresta indisturbata e FN (falsi-negativi) corrisponde al numero di pixel identificati come foresta indisturbata ma che sono invece tagliate. Infine, indichiamo con VN (veri-negativi) il numero di pixel identificati correttamente come foresta indisturbata.

PA rappresenta il rapporto tra il numero di pixel correttamente classificati e il numero totale di pixel utilizzati, mentre UA corrisponde al rapporto tra il numero di pixel correttamente classificati e il numero di pixel classificati come utilizzati.

La mappa ottenuta automaticamente con 313D è stata poi sottoposta ad una valutazione più nel dettaglio e di tipo qualitativo e messa quindi a confronto con i dati rilevati a terra dai CCF. In particolare, quest'analisi ha lo scopo di identificare eventuali relazioni fra gli errori commessi dall'algorithmo e: (1) specie forestale; (2) numero di matricine residue; (3) tipologia del taglio; e (4) dimensione dell'intervento.

Risultati

L'algorithmo 313D ha identificato correttamente e in maniera completamente automatica 1549 ha dei 1841 presenti nel dataset di validazione. In altri termini, 313D sottostima la superficie delle tagliate del 16% mentre i dati SIGAF producono una sovrastima del 53%. In riferimento all'accuratezza, 313D presenta errori di commissione del 2% ed errori di omissione del 18% (Tab. 1).

Dalla mappa SIGAF risultano invece 2822 ha, di cui 607 ha coincidono con quelli mappati da 313D e 660 ha coincidono con i dati di validazione (Fig. 2).

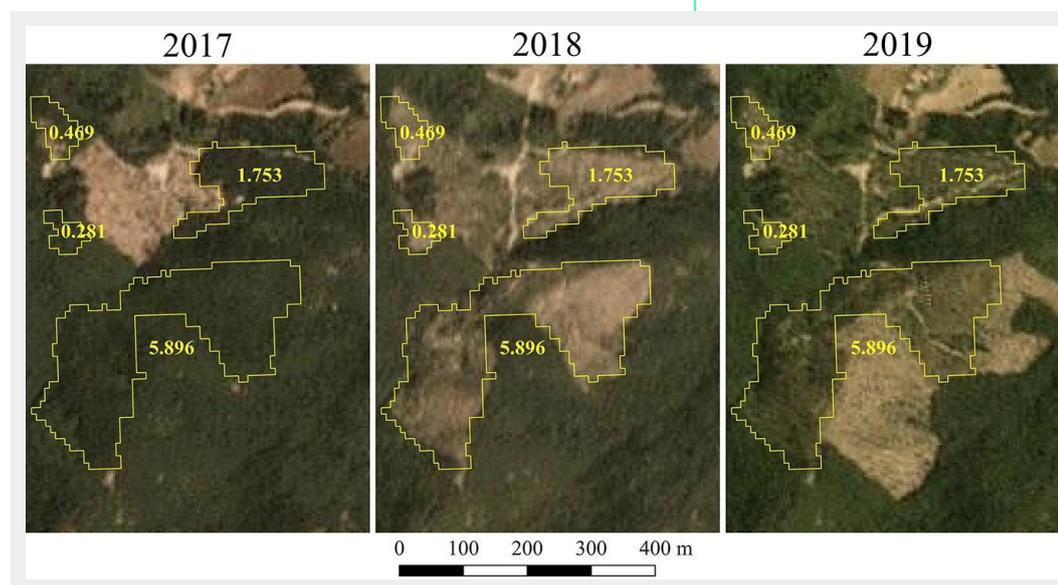


Fig. 2 - Esempio di mappatura automatica delle aree forestali sottoposte a taglio tramite l'algorithmo 313D. In giallo le aree tagliate identificate nel 2018, sullo sfondo 3 immagini PlanetScope.

Fig. 3 - Rappresentazione dei risultati della matrice di confusione per i disturbi individuati grazie all'algoritmo 3I3D in riferimento al dataset di verifica.

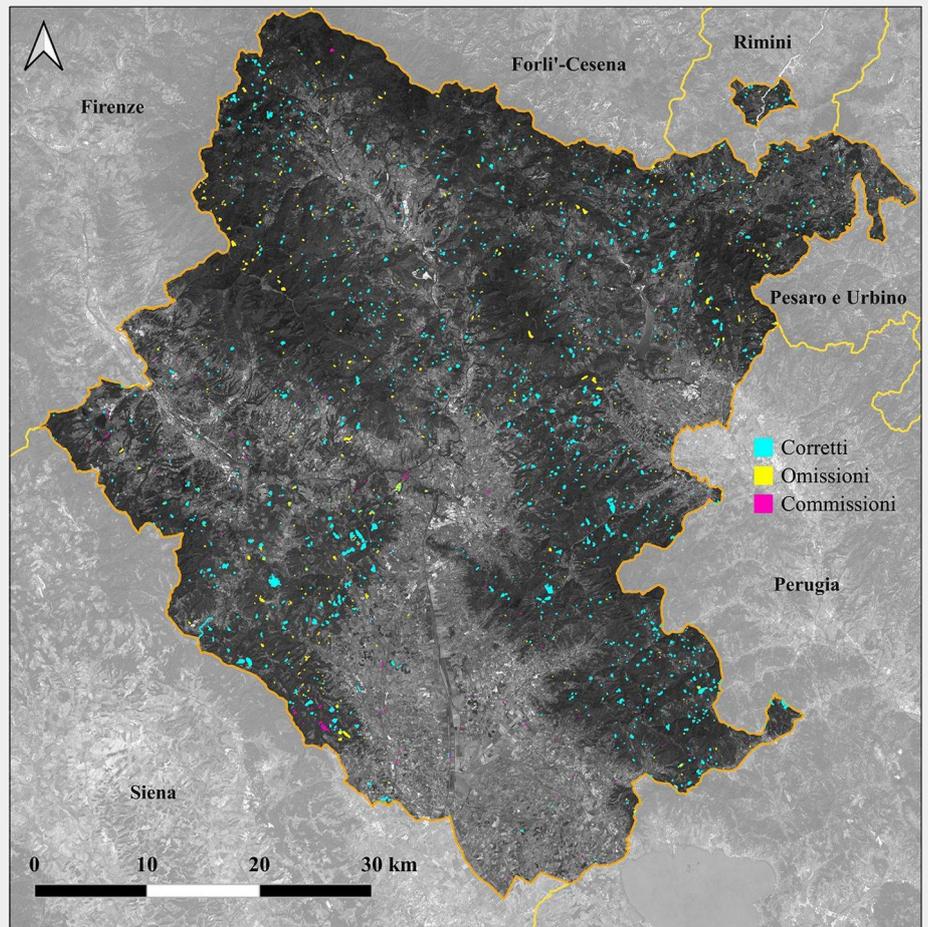
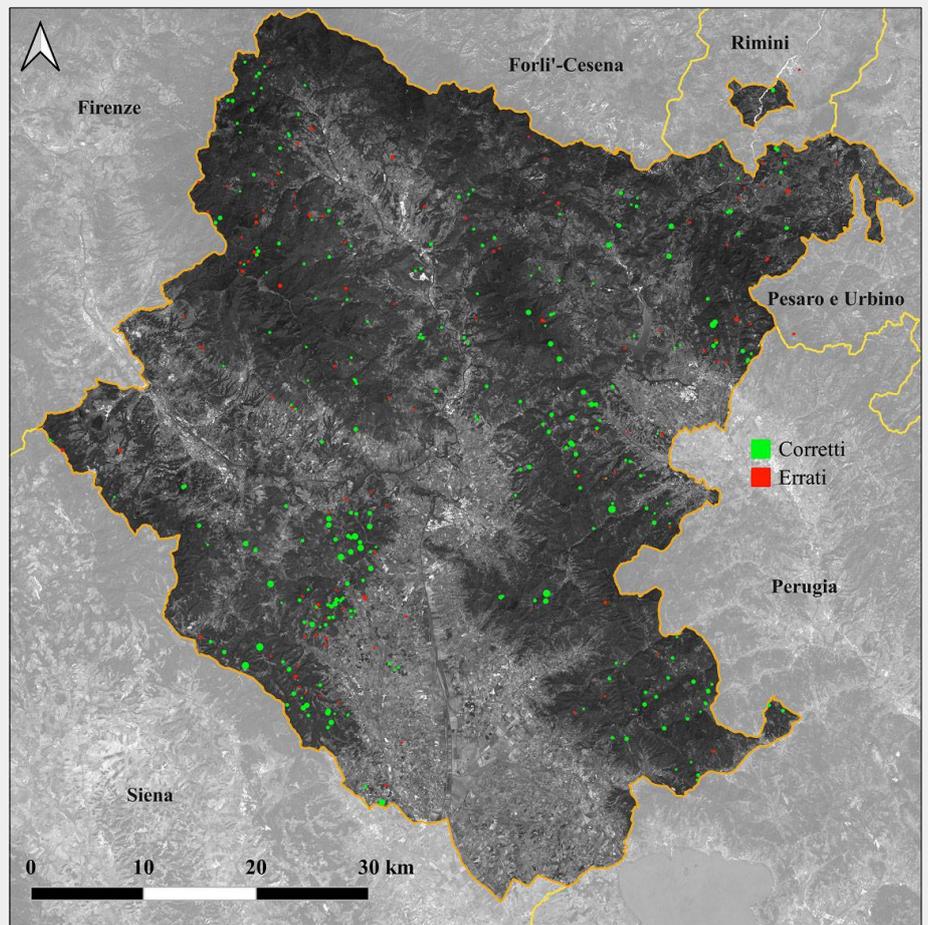


Fig. 4 - Utilizzazioni georeferenziate dai Carabinieri Forestali, e confronto con i risultati ottenuti tramite l'algoritmo 3I3D.



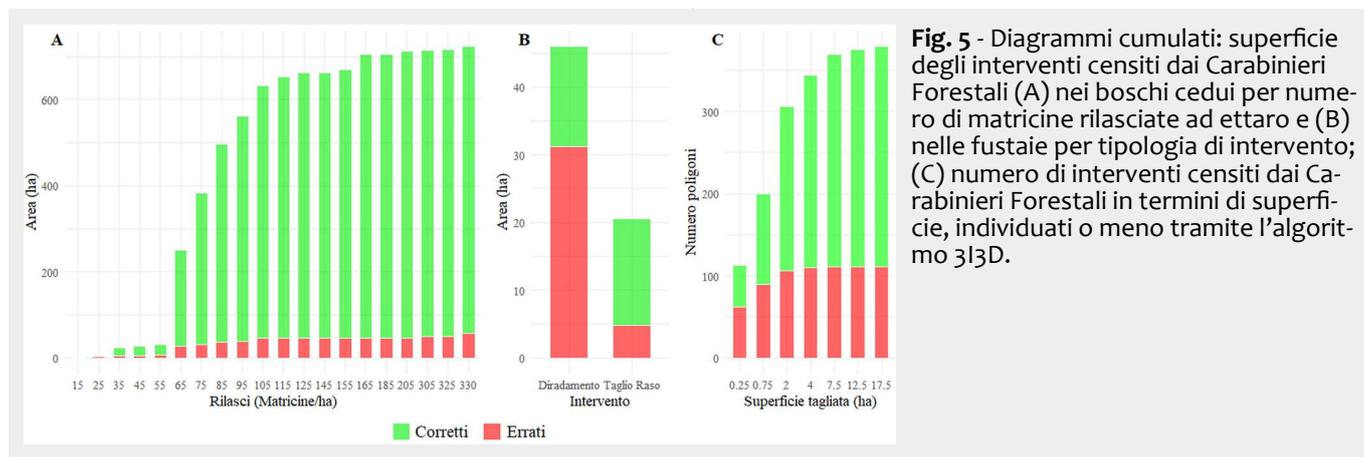


Fig. 5 - Diagrammi cumulati: superficie degli interventi censiti dai Carabinieri Forestali (A) nei boschi cedui per numero di matricine rilasciate ad ettaro e (B) nelle fustaie per tipologia di intervento; (C) numero di interventi censiti dai Carabinieri Forestali in termini di superficie, individuati o meno tramite l'algoritmo 313D.

La mappa delle utilizzazioni prodotta utilizzando l'algoritmo 313D è stata poi confrontata con i dati acquisiti a terra dai CCF e con quelli disponibili con la banca dati SIGAF (Fig. 3). Delle 376 tagliate censite dai CCF (per un totale di 771 ha), 261 (l'87% in termini di superficie) sono state identificate correttamente utilizzando 313D (Fig. 4).

Gli interventi censiti e correttamente individuati nella mappa 313D sono per oltre il 95% dei casi ceduzioni con un rilascio di circa 80 matricine ad ettaro (Fig. 5A). Per i boschi cedui, la difficoltà di individuare i disturbi è risultata proporzionale al numero di matricine rilasciate, mentre per le fustaie è risultata particolarmente difficoltosa l'individuazione dei diradamenti (Fig. 5B). Complessivamente gli interventi non individuati presentano piccole dimensioni, con una superficie che in oltre la metà dei casi (56%) risulta di 0.25 ha e comunque nel 75% dei casi è inferiore ai 2 ha; la superficie media è di 2.5 ha (Fig. 5C).

Oltre il 75% degli errori di omissione sono ceduzioni con una superficie media relativamente bassa (0.7 ha) e con un elevato numero di matricine rilasciate (in media 115 matricine ad ettaro - Fig. 5A). Un ulteriore 16% ricade invece in diradamenti in fustaia, in cui, a fronte di una superficie degli interventi mediamente maggiore (1.8 ha), la copertura della chioma si mantiene elevata anche dopo il taglio. I restanti errori di omissione consistono in tagli rasi in fustaia (7% per complessivi 4.75 ha - Tab. 2).

Infine, dalla mappa del SIGAF risultano 2822 ha di interventi. Di questi, 660 ha sono identificati e quindi presenti anche nel dataset di validazione, 607 ha coincidono con i disturbi identificati tramite l'algoritmo 313D.

Discussione

La mappa delle utilizzazioni ottenuta automaticamente con l'uso dell'algoritmo 313D ha identificato nella provincia di Arezzo 1549 ha di tagliate effettuate nel 2018, sottostimando il dato reale del 16%.

La *Producer Accuracy*, che cresce al diminuire degli errori

di omissione, risulta dell'82%, mentre la *User Accuracy* è inversamente proporzionale alla presenza di errori di commissione e si attesta al 98%.

D'altra parte, l'algoritmo 313D potrebbe essere calibrato in modo da avere una sensibilità maggiore. In questo lavoro abbiamo utilizzato $PI = 90\%$ ed eliminato quindi i possibili disturbi forestali con una probabilità di essere correttamente identificati inferiore al 90%, ma valori di PI inferiori potrebbero essere testati. Naturalmente, al diminuire degli errori di omissione aumenterebbero gli errori di commissione e si renderebbero ancora più indispensabili analisi in campo per correggere le stime delle superfici disturbate.

Gli errori di omissione dell'algoritmo 313D consistono principalmente in interventi di piccole dimensioni e in cui è conservata una densa copertura del soprassuolo. Tipico esempio sono i diradamenti poco intensi e le ceduzioni con rilascio di molte matricine. Altri errori di omissione sono dovuti ad un errore sistematico legato alla risoluzione geometrica delle immagini Sentinel-2 e che fa sì che alcuni poligoni, anche se correttamente identificati, vengano individuati con un perimetro leggermente più piccolo (1-2 pixel o 10-20 metri). Nonostante questi errori, e nonostante il campione controllato a terra dai CCF sia costituito da interventi particolari e non semplici da individuare da satellite, l'algoritmo 313D individua correttamente l'87% delle superfici.

Gli errori di commissione presenti nella mappa 313D consistono in 126 poligoni (33 ha). Questi errori possono essere divisi in tre principali gruppi.

Primo, disturbi forestali come forti disseccamenti che hanno determinato una diminuzione di attività fotosintetica tale da "ingannare" l'algoritmo (50 poligoni ovvero, in termini di superficie, il 40% degli errori di commissione). Questo dato dimostra che l'algoritmo 313D è in grado di identificare, oltre alle tagliate, anche altre tipologie di disturbi di varia natura.

Tab. 2 - Schema riassuntivo dei risultati e degli errori commessi dall'algoritmo 313D per tipologia di intervento.

Tipo	N Interventi	Area totale (ha)	Area media (ha)	Rilasci medi (ha ⁻¹)
Corretti	264	677.5	2.57	-
Ceduo	250	647	2.59	82
Diradamento Fustaia	6	14.75	3.25	-
Taglio raso Fustaia	8	15.75	1.97	-
Errati	112	93.5	0.83	-
Ceduo	87	57.5	0.66	115
Diradamento Fustaia	17	31.25	1.81	-
Taglio raso Fustaia	8	4.75	0.59	-
Totale complessivo	376	771	2.05	90

Secondo, aree erroneamente non eliminate dalla maschera del bosco, ovvero aree con cambiamenti spettrali coerenti con quelli attesi per le aree utilizzate (per esempio la ripulitura effettuata in aree agricole) ma che invece non ricadono in aree boscate. Sono quindi errori attribuibili più alla maschera del bosco che all'algoritmo 313D (70 poligoni ovvero il 55% degli errori di commissione).

Terzo, tagliate erroneamente identificate dall'algoritmo (6 poligoni, ovvero soltanto il 5% degli errori di commissione totali). Tali errori possono essere dovuti al fatto che alcune aree non presentano un sufficiente numero di immagini Sentinel-2 prive di nuvole per garantire il corretto funzionamento dell'algoritmo.

Per lo stesso periodo e area di studio, la mappa delle pratiche amministrative del SIGAF riporta invece 2822 ha di interventi, di cui solo poco più del 20% risultano essere realmente eseguiti (607 ha secondo la procedura automatica 313D, 660 ha secondo il dataset di validazione). La differenza tra le superfici dichiarate nel SIGAF e quelle realmente utilizzate è probabilmente da imputare al fatto che le pratiche inserite nel SIGAF hanno validità triennale e quindi potranno tramutarsi in reali interventi anche negli anni successivi a quello di studio.

Conclusioni

L'uso dell'algoritmo 313D ha permesso di identificare con procedura completamente automatica 1550.19 ha di utilizzazioni effettuate nel 2018 in Provincia di Arezzo, sottostimando il dato reale del 16%. La *User accuracy* è risultata del 98% mentre la *Producer accuracy* del 82%.

Dai risultati ottenuti risulta evidente come l'analisi delle traiettorie spettrali da immagini acquisite da sensori satellitari come il Sentinel-2 possano costituire un valido supporto per il monitoraggio delle utilizzazioni, anche nel contesto italiano.

D'altra parte, che i disturbi alle foreste fossero visibili tramite immagini telerilevate multispettrali multitemporali era noto fin dall'alba del telerilevamento (Malila 1980). Ciò che ha determinato una nuova fase nello sviluppo di queste tecniche è basato su tre elementi: (i) la disponibilità in rete della gran parte dei dati da satellite in forma di *open data*; (ii) l'aumentato numero dei satelliti per l'osservazione terrestre; (iii) l'accesso per tutti ai sistemi di *cloud computing*. Oggi possiamo elaborare una mole di dati con una velocità che solo 10 anni fa era difficilmente ipotizzabile: in tal senso *Google Earth Engine*TM è da considerarsi un vero *game changer* (Chirici 2020).

Dall'analisi della banca dati del GIS Foreste del SIGAF per la stessa area e periodo di studio è stato verificato che questi dati non possano essere utilizzati per il monitoraggio delle effettive utilizzazioni ma solo degli interventi richiesti. È quindi ancora da esplorare come questi risultino collegati alle reali utilizzazioni quando il periodo di confronto si allunghi a una finestra mobile di almeno 3 anni, il periodo entro cui le richieste riportate nel SIGAF si dovrebbero concretizzare in interventi reali.

Per questi motivi crediamo sia giunto il momento di esplorare un trasferimento di queste tecnologie dalla sperimentazione scientifica a una fase di operatività con la implementazione di un sistema permanente di monitoraggio delle foreste. Esso dovrà mettere a sistema tutte le fonti informative attualmente disponibili sulle foreste: l'Inventario Forestale Nazionale e le altre osservazioni *in situ*, le cartografie forestali, le fonti di dati amministrativi e il monitoraggio multiplatforma da telerilevamento. I tempi sono maturi.

Bibliografia

Arrigoni PV, Raffaelli M, Rizzotto M, Di Tommaso PL, Miniati U, Foggi B, Selvi F, Lombardi L, Viciani D, Benesperi R, Benucci S, Ferretti G, Menicagli E, De Dominicis V, Tomei PE (1999). Carta

della vegetazione forestale della Toscana (Scala 1: 250.000). Regione Toscana, Firenze.

Chirici G (2020). Una nuova era nell'uso del telerilevamento a supporto della pianificazione sostenibile del territorio Big Data e intelligenza artificiale a portata di mano. *Contesti* 1: 14-35. - doi: [10.13128/contest-11988](https://doi.org/10.13128/contest-11988)

Chirici G, Giannetti F, Mazza E, Francini S, Travaglini D, Pegna R, White JC (2020). Monitoring clearcutting and subsequent rapid recovery in Mediterranean coppice forests with Landsat time series. *Annals of Forest Science* 77 (2): 453. - doi: [10.1007/s13595-020-00936-2](https://doi.org/10.1007/s13595-020-00936-2)

Chirici G, Giuliarelli D, Biscontini D, Tonti D, Mattioli W, Marchetti M, Corona P (2011). Large-scale monitoring of coppice forest clearcuts by multitemporal very high resolution satellite imagery. A case study from Central Italy. *Remote Sensing of Environment* 115: 1025-1033. - doi: [10.1016/j.rse.2010.12.007](https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.007)

Corona P, Giuliarelli D, Lamonaca A, Mattioli W, Tonti D, Chirici G, Marchetti M (2007). Confronto sperimentale tra superfici a ceduo tagliate a raso osservate mediante immagini satellitari ad alta risoluzione e tagliate riscontrate amministrativamente. *Forest@* 4: 324-332. - doi: [10.3832/eforo468-0040324](https://doi.org/10.3832/eforo468-0040324)

D'Amico G, Vangi E, Francini S, Giannetti F, Nicolaci A, Travaglini D, Massai L, Giambastiani Y, Terranova C, Chirici G (2021). Are we ready for a National Forest Information System? State of the art of forest maps and airborne laser scanning data availability in Italy. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 14 (2): 144-154. - doi: [10.3832/ifor3648-014](https://doi.org/10.3832/ifor3648-014)

Drusch M, Del Bello U, Carlier S, Colin O, Fernandez V, Gascon F, Hoersch B, Isola C, Laberinti P, Martimort P, Meygret A, Spoto F, Sy O, Marchese F, Bargellini P (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment* 120: 25-36. - doi: [10.1016/j.rse.2011.11.026](https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026)

Francini S, McRoberts RE, Giannetti F, Mencucci M, Marchetti M, Scarascia Mugnozza G, Chirici G (2020). Near-real time forest change detection using PlanetScope imagery. *European Journal of Remote Sensing* 53 (1): 233-244. - doi: [10.1080/22797254.2020.1806734](https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1806734)

Francini S, McRoberts RE, Giannetti F, Marchetti M, Scarascia Mugnozza G, Chirici G (2021). The three indices three dimensions (313D) algorithm: a new method for forest disturbance mapping and area estimation based on optical remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing* 42 (12): 4697-4715. - doi: [10.1080/01431161.2021.1899334](https://doi.org/10.1080/01431161.2021.1899334)

Giannetti F, Pegna R, Francini S, McRoberts RE, Travaglini D, Marchetti M, Scarascia Mugnozza G, Chirici G (2020). A new method for automated clear-cut disturbance detection in Mediterranean coppice forests using Landsat time series. *Remote Sensing*, 12(22), 3720. - doi: [10.3390/rs12223720](https://doi.org/10.3390/rs12223720)

Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R (2017). Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment* 202: 18-27. - doi: [10.1016/j.rse.2017.06.031](https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031)

Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Hancher M, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, Komareddy A, Egorov A, Chini L, Justice CO, Townshend JR (2013). High-resolution global maps of 21st century forest cover change. *Science* 342 (6160): 850-853. - doi: [10.1126/science.1244693](https://doi.org/10.1126/science.1244693)

Hermosilla T, Wulder MA, White JC, Coops NC, Hobart GW, Campbell LB (2016). Mass data processing of time series Landsat imagery: pixels to data products for forest monitoring. *International Journal of Digital Earth* 9 (11): 1035-54. - doi: [10.1080/17538947.2016.1187673](https://doi.org/10.1080/17538947.2016.1187673)

INFC (2007). Le stime di superficie 2005 - Prima parte. In: "Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio" (Tabacchi G, De Natale F, Di Cosmo L, Floris A, Gagliano C, Gasparini P, Genchi L, Scrinzi G, Tosi V eds). MiPAF - Corpo Forestale dello Stato - Ispettorato Generale, CRA - ISAF, Trento. [online] URL: <http://www.infc.it>

ISTAT (2014). I consumi energetici delle famiglie - Anno 2013. Sta-

tistiche Report ISTAT, Roma. [online] URL: https://www.istat.it/it/files//2014/12/StatReport_Consumi_energetici.pdf

Kennedy RE, Yang Z, Cohen WB (2010). Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. *Remote Sensing of Environment* 114: 2897-2910. - doi: [10.1016/j.rse.2010.07.008](https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.008)

Kennedy RE, Yang Z, Gorelick N, Braaten J, Cavalcante L, Cohen WB, Healey S (2018). Implementation of the Landtrendr algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing* 10 (5): 691. - doi: [10.3390/rs10050691](https://doi.org/10.3390/rs10050691)

Malila W (1980). Change vector analysis: an approach for detecting forest changes with Landsat. In: Proceedings of the LARS Symposia "6th Annu Symp Remotely Sensed Data and Soil Inf Syst and Remote Sensing and Soil Surv". Lafayette (IN, USA) 3-6 June 1980, pp. 326-335. [online] URL: http://docs.lib.purdue.edu/lars_symp/385/

Marongiu S, Gismondi R (2018). Le problematiche delle statistiche forestali e le prospettive future: un inquadramento delle indagini ISTAT nel nuovo PSN 2017-2019. *L'Italia Forestale e Montana* 73 (2): 79-90.

MIPAAF (2019). RaF Italia 2017-2018. Rapporto sullo stato delle foreste e del settore forestale in Italia. Compagnia delle Foreste, Arezzo.

Pilli R (2011). Confronto su base provinciale tra i dati ISTAT sulle utilizzazioni legnose in foresta e la superficie boscata riportata dall'INFC. *Forest@* 8: 113-120. - doi: [10.3832/eforo661-008](https://doi.org/10.3832/eforo661-008)

Regione Toscana (2019). RaFT 2019. Rapporto sullo stato delle foreste in Toscana. Compagnia delle Foreste, Arezzo.

White JC, Wulder MA, Hobart GW, Luther JE, Hermosilla T, Griffiths P, Coops NC, Hall RJ, Hostert P, Dyk A, Guindon L (2014). Pixel-based image compositing for large-area dense time series applications and science. *Canadian Journal of Remote Sensing* 40 (3): 192-212. - doi: [10.1080/07038992.2014.945827](https://doi.org/10.1080/07038992.2014.945827)