

Monitoraggio del ciclo fenologico della vegetazione attraverso l'impiego di immagini webcam

Tommaso Julitta (*), Roberto Colombo (*), Edoardo Cremonese (**),
Mirco Migliavacca (***), Micol Rossini (*), Sergio Cogliati (*), Lorenzo Busetto (*),
Marta Galvagno (**), Umberto Morra di Cella (**)

(*) Remote Sensing of Environmental Dynamics Laboratory, Dip. Scienze dell'Ambiente e del Territorio
Università Milano-Bicocca, Piazza della Scienza 1, 20126 Milano, Italy, t.julitta@campus.unimib.it

(**) Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Valle d'Aosta, Sez. Agenti Fisici, Aosta, Italy

(***) European Commission, DG-JRC, Institute for Environment and Sustainability
Climate Change Unit, Via E. Fermi 1, Ispra 21020 (VA), Italy

Riassunto

In questo contributo viene presentato uno studio volto alla caratterizzazione e al monitoraggio delle fasi fenologiche di un ecosistema terrestre (foresta di *Larix decidua*) attraverso l'impiego di indici spettrali derivati da immagini webcam. La stazione webcam è posizionata su una torre di altezza pari a 20 m, tale da permettere il monitoraggio della canopy mediante osservazioni frontali. La webcam, installata nell'aprile 2009, ha permesso l'acquisizione di immagini in continuo a livello giornaliero e stagionale. Nel corso della stagione primaverile, estiva e autunnale, sono state effettuate osservazioni di campo settimanali necessarie determinare i diversi stadi fenologici. A partire dalle immagini webcam sono stati calcolati alcuni indici di vegetazione e a partire dall'analisi del trend di questi è stato possibile valutare le date di inizio, fine e durata della stagione vegetativa. Il calcolo degli indici di vegetazione è stato effettuato sia a livello di regioni di interesse omogenee, sia a livello di singoli pixel, permettendo di indagare la variabilità spaziale e temporale e di evidenziare all'interno dell'immagine differenti aree a diverso comportamento fenologico. I risultati ottenuti si sono mostrati in accordo con le misure di campo e con i risultati ottenuti mediante l'applicazione di un modello fenologico guidato da variabili climatiche (*Growing Season Index*), dimostrando come l'impiego di camere commerciali, a costi ridotti, possa essere un utile strumento per il monitoraggio del ciclo fenologico della vegetazione.

Abstract

This paper shows a study focused on the characterization and monitoring of phenological phases of a terrestrial ecosystem (*Larix decidua* forest) using spectral indices derived from webcam images. The webcam station has been positioned above a tower 20 m high, which allows the canopy monitoring through front observation. The webcam was installed in April 2009 and from that date allows to collect pictures in hourly interval. During spring, summer and autumn, were also conducted weekly surveys related to the different phenological stages through field observation. From the webcam pictures were derived normalized vegetation indices that allowed to determine the dates of beginning and end of the growing season, and the length of it. Vegetation indices have been carried out both in the homogeneous regions of interest, both at the individual pixels, allowing to investigate the spatial and temporal variability and highlight areas within the image at different phenological behavior. Results are in agreement with field measurements and with results achieved through the application of phenological model (*Growing Season Index*), showing that the use of cheaper commercial camera could be a useful instrument for monitoring the vegetation phenological cycle.

Introduzione

Per fenologia si intende la scienza che si occupa di comprendere la variabilità dei cicli riproduttivi e vegetativi delle piante, con particolare attenzione rivolta alla relazione esistente tra tali eventi e i differenti fattori abiotici e biotici che li influenzano (Lieth, 1974). A causa di questa forte dipendenza da fattori di natura abiotica (e.g. clima) è stato dimostrato come l'osservazione e la classificazione delle fasi fenologiche della vegetazione possa essere un importante indicatore di cambiamenti climatici a scala globale (Schwartz & Reiter, 2000; Badeck et al., 2004). Poiché la classificazione delle fasi fenologiche può essere utilizzata come indicatore di cambiamenti climatici, le analisi effettuate su ecosistemi particolarmente sensibili a cambi di clima (e.g. le Alpi europee) sono estremamente interessanti. In questa direzione si è recentemente mossa la comunità scientifica, focalizzandosi particolarmente sul monitoraggio di ecosistemi forestali (Ahrends et al., 2008; Busetto et al., 2010; Fonti et al., 2010; Migliavacca et al., 2008; Moser et al., 2010).

Nel mondo vegetale i principali avvenimenti che descrivono la fenologia sono il germogliamento, la senescenza e la caduta delle foglie; a partire da questi eventi è possibile dedurre la durata della stagione vegetativa (Migliavacca et al., 2008). Questi eventi chiave hanno una durata limitata nel tempo e per determinarne con esattezza le date corrispondenti sono necessarie frequenti osservazioni di campo durante la stagione di crescita, il che corrisponde a uno sforzo elevato sia in termini di personale sia in termini di costi (Sparks et al., 2006). Le osservazioni di campo possono essere integrate con osservazioni satellitari con lo scopo di spazializzare conoscenze locali su larga scala (Schwartz, 1999), e con l'impiego di sistemi di *proximal sensing*, quali le stazioni webcam. Un ulteriore sostegno all'*upscaling* dell'osservazione di campo è fornito dall'applicazione di modelli matematici il cui fine è quello di colmare il *gap* esistente tra le vaste aree oggetto dell'analisi di immagini satellitari e le variabili guida che sono desunte dalle osservazioni al suolo (Jolly et al., 2005). Sia le tecniche di *remote sensing* sia i modelli fenologici, guidati da variabili climatiche, rappresentano un importante strumento per comprendere e predire le risposte della vegetazione alla variabilità interannuale e offrono un'opportunità per analizzare e definire quali siano i ruoli dei differenti fattori ambientali nel determinare la fenologia delle piante (Jolly et al., 2005).

Nel presente articolo particolare interesse è rivolto all'utilizzo di sistemi di monitoraggio di prossimità, quali le webcam, che permettono, a costi ridotti, un'acquisizione continua nel tempo della dinamica della vegetazione. Negli ultimi anni, con la rapida diffusione di questa tipologia di strumenti, sono numerosi gli studi che hanno mostrato come l'analisi di immagini acquisite in continuo sia un utile mezzo per il monitoraggio *in situ* di cicli fenologici in diversi ecosistemi forestali (Ahrends et al., 2008; Ahrends et al., 2009; Bradley et al., 2010; Graham et al., 2010; Richardson et al., 2009; Richardson et al., 2007) e in praterie aride (Jacobs et al., 2009, Migliavacca et al., 2011).

L'obiettivo del presente studio è quello di valutare l'impiego di webcam per il monitoraggio del ciclo fenologico di un ecosistema forestale (*Larix decidua*), confrontando gli indici ottici derivati dalle elaborazioni delle immagini webcam sia con osservazioni di campo sia con il ciclo stagionale simulato da un modello fenologico guidato da variabili climatiche.

Area di studio e dati impiegati

Il sito oggetto dello studio è una foresta di Larice (*Larix decidua*) situata a 2100 m. s.l.m. nelle Alpi Nord-occidentali presso il comune di Torgnon (AO). L'area è classificata come intra-alpina con un clima semi-continentale, temperatura media annua di 3.1 °C e precipitazione media annua di 920 mm. Il sito sperimentale è dotato di stazioni di misura di variabili micrometeorologiche e flussi di anidride carbonica e di vapor acqueo basati sulla tecnica *eddy covariance*. Gli strumenti di misura sono dislocati a varie altezze, da altezza suolo sino a un massimo di 21 m da terra. Gli strumenti per la misura delle variabili meteorologiche tradizionali sono: un sensore Vaisala di temperatura e umidità relativa (Modello HMP45C, *Campbell Scientific*), un pluviometro a vaschette oscillanti (Modello FSS 500, *Campbell Scientific*), un radiometro netto (K&Z).

Al sito è stata installata nell'aprile 2010 una webcam (modello CC640 Cambell Scientific, Logan, Utah, USA). Questa è situata a un'altezza di 22 m dal suolo, è puntata a nord a circa 20° sotto l'orizzonte seguendo le indicazioni di Richardson et al.(2007) ed è dotata di una lente focale di 3.5 mm con campo di vista pari a 79.8 gradi. La camera è connessa a un *data-logger* Campbell modello CR1000 e permette l'acquisizione di immagini della stessa scena in continuo (a passo orario dalle 10 alle 17) formato JPEG, risoluzione 640 x 480, 0.3 megapixels, dotata di tre canali RGB, 8-bit ciascuno. Il modello utilizzato prevede una regolazione automatica del tempo di esposizione e del bilanciamento del bianco, variabile a seconda dei diversi livelli di illuminazione della scena.

Il presente studio è basato sull'impiego di 2132 immagini raccolte dalla webcam nell'anno 2010, a partire dall'istallazione (09-04-2010, day of the year, DOY 99) fino a fine anno (31-12-2010, DOY 365). In figura 1 viene riportato il sito di misura e l'area ripresa dalla webcam.



Figura 1 – a) Webcam modello CC640 installata presso il sito sperimentale di Torgnon (AO).
b) Area ripresa dalla webcam. In nero la regione di interesse impiegata nell'analisi.

Metodi

Pre-elaborazione delle immagini

Le immagini acquisite con Webcam possono risultare affette da rumore provocato da molteplici cause (e.g. insufficiente risoluzione radiometrica, aberrazioni ottiche, disturbi termici, umidità e condensa), inoltre possono essere soggette a pre-elaborazioni standard (e.g. bilanciamento automatico del bianco) che possono rendere complicati i confronti delle immagini nel tempo; infine possono includere effetti esterni indesiderati quali la geometria di presa e le condizioni atmosferiche al momento delle riprese (e.g. Migliavacca et al., 2011, Sonnentag et al., 2011). Questi elementi introducono una serie di incertezze e limitazioni nell'impiego delle webcam per il monitoraggio del ciclo fenologico e pertanto devono essere opportunamente considerati per selezionare i dati di buona qualità.

In questo studio sono state affrontate con particolare attenzione alcune tecniche per la rimozione di pixel saturi, per la riduzione del rumore presente nelle immagini e per il filtraggio temporale necessario alla ricostruzione delle serie.

La rimozione dei pixel saturi è stata effettuata mediante l'applicazione di filtri adattivi (*adaptive filter* in IDL vs 7.0). Tali filtri prevedono la sostituzione del valore di DN specificato (255) con una media di un intorno, le cui dimensioni sono definite dall'utente, in questo caso si è scelto di impiegare una finestra di convoluzione di dimensioni pari a 5x5 pixel.

La riduzione del rumore dell'immagine è stata effettuata impiegando filtri adattivi (Lee, 1980) (tipicamente impiegati sulle immagini radar). Tale filtro prevede l'applicazione sull'immagine di una finestra di convoluzione di dimensione specifica (nello studio sono stati effettuate due prove: prima finestra testata: dimensione pari a 3x3 pixel; seconda finestra testata: dimensione pari a 6x6

pixel). All'interno della finestra selezionata i pixel con una deviazione standard superiore a un soglia predefinita ($\sigma = 0.25$) sono sostituiti con un valore pari alla media dell'intorno.

Oltre alle elaborazioni delle immagini relative alle caratteristiche strumentali della camera, per effettuare un confronto di indici ottici di vegetazione relativi alla *canopy* osservata, è necessario considerare la variabilità della geometria di presa (movimento delle ombre interne all'immagine) e le condizioni atmosferiche variabili.

Il primo passaggio ha quindi implicato la riduzione dell'influenza delle ombre interne all'immagine. È stata osservata una distribuzione bimodale dei valori del pixel contenuti nel canale del rosso che è riconducibile alla distinzione di zone in ombra (prima moda) e in luce (seconda moda). Selezionando i pixel che fanno parte della prima moda è possibile mettere in evidenza le zone d'ombra dell'immagine che non verranno in seguito considerate nell'estrazione di indici che potrebbero risultarne influenzati. La distinzione delle due mode è stata effettuata a partire dal *density plot*, mediante derivata prima. Per evitare di falsare l'istogramma del canale rosso, il diagramma di frequenza non tiene conto dei pixel contenuti nel cielo.

Il passaggio successivo ha previsto l'individuazione delle immagini acquisite in condizioni meteo di *clear sky*, tali da permettere la selezione di dati di buona qualità utili nel proseguo dell'analisi.

Il canale blu è quello che è risultato maggiormente influenzato da fenomeni di diffusione atmosferica, per questo motivo analizzando l'andamento nel tempo del valore minimo del canale blu all'interno di una ROI relativa a un'area sufficientemente ampia è stato possibile mettere in evidenza le differenze tra giorni di *clear sky* e giorni *cloud sky*. Questo sistema di filtraggio è stato confrontato con un metodo statistico impiegato nel filtraggio di serie temporali (MAD, *median absolute deviation*, Y. H. Yang and M. D. Levine, 1992), basato sulla deviazione standard relativa al valore mediano calcolato all'interno di una finestra mobile sulla serie, e con il *Cloudiness Index* appositamente calcolato come rapporto tra radiazione globale misurata al sito riferita e radiazione potenziale (Bird and Hulstrom, 1981).

Calcolo degli indici ottici e stima delle fasi fenologiche

Per l'analisi e il processamento delle immagini è stato messo a punto uno specifico codice in R (versione 2.12.1). L'analisi è stata condotta sia a livello di una specifica area di interesse, sia a livello di singoli pixel. Data la necessità di calcolare indici di vegetazione, quindi riferiti alla parte fogliare, la regione di interesse (*Region of Interest*, ROI) impiegata è rappresentativa delle sole chiome. Gli indici di vegetazione, calcolati a partire da aree di interesse che considerano al loro interno più individui di una stessa specie, hanno permesso pertanto di ottenere un dato medio riferito all'insieme degli individui considerati. Il dato così ottenuto può essere un elemento positivo per la caratterizzazione del sito indagato. Allo stesso tempo, l'estrazione di un unico indice rappresentativo di un'ampia area è una criticità dell'analisi poiché non permette di identificare all'interno dell'area individui distinti che possono manifestare comportamenti diversi, o talvolta anomali. Per questo motivo si è deciso di operare sia a livello di ROI sia a livello di singolo pixel che permette di distinguere singoli individui. La variabilità spaziale delle immagini, dovuta all'influenza del vento e al naturale sviluppo delle chiome fa sì che un pixel non sia rappresentativo di un elemento costante nel tempo (Ahrends, 2008), ma che vari durante la stagione. Per questo motivo l'analisi condotta a livello di pixel ha portato a effettuare un'aggregazione di pixel (*pixel aggregation*), come rappresentativi di una minima area costante nel tempo (la finestra di aggregazione scelta nell'analisi è pari a 10x10 pixel).

Gli indici di vegetazione (*Vegetation Index*, VI) proposti da Richardson et al., (2009) sono stati calcolati a partire da ogni immagine acquisita.

A partire dalla *brightness* totale della ROI (alla somma dei *Digital Number*, DN, presenti nei tre canali RGB) è stato calcolato un indice equivalente alla percentuale di *brightness* del canale verde, *Greenness index* (GI) (eq.1):

$$GI = G_{DN} / R_{DN} + G_{DN} + B_{DN} \quad [1]$$

In cui R_{DN} , G_{DN} , B_{DN} sono rispettivamente i valori in DN dei canali rosso, verde e blu. Inoltre è stato calcolato un indice ulteriore, il *Greenness excess index* (GEI) (eq. 2)

$$GEI = 2 \cdot G_{DN} - (R_{DN} - B_{DN}) \quad [2]$$

Questi indici sono stati estratti per ogni pixel e, a seconda del procedimento (singola ROI o *pixel aggregation*), sono stati successivamente mediati. Per limitare effetti legati alla variabilità giornaliera e per mantenere un dato rappresentativo della singola giornata, gli indici sono stati calcolati utilizzando le immagini acquisite a *midday* (tra le 11.00 e le 13.00, ora solare).

La maggior parte dei dati scartati è concentrata nella fase di sviluppo della vegetazione (mese di maggio). Durante questa fase, grazie al germogliamento e allo sviluppo delle foglie, l'indice GI e l'indice GEI sono correlati con la radiazione intercettata dalla vegetazione (*fraction of Intercepted photosynthetically active radiation*, fIPAR), dato misurato presso la stazione di misura e continuo. Questa, appositamente posta in regressione con gli indici GI e GEI, ha permesso il *gap-filling* delle serie di questi.

Le serie così ottenute sono state interpolate con una spline cubica e, a partire dai percentili da questa derivati, sono state definite le metriche corrispondenti alle date osservate in campo relative alle diverse fasi fenologiche della vegetazione. Le osservazioni di campo sono state effettuate a frequenza settimanale durante primavera e autunno, seguendo il protocollo per studi fenologici a livello di foresta (Partanen et al. 1998; Norby et al. 2003; Richardson et al. 2006, Migliavacca et al. 2008). Le metriche definite valide per l'estrazione delle date di partenza e senescenza della stagione vegetativa sono quelle che presentano il minor scostamento dalle date di partenza e fine osservate in campo.

Applicazione modello fenologico (GSI)

Il modello *Growing Season Index* (GSI, Jolly et al., 2005) permette di modellare lo sviluppo della vegetazione a partire da tre fattori climatici di controllo: Temperatura minima giornaliera T_{MIN} (°C), fotoperiodo (h), e deficit di pressione di vapore VPD (Pa). Il valore giornaliero dell'indice GSI è stato calcolato basandosi su una media mobile, kernel pari a 21 giorni, dell'indice iGSI. Questo è stato invece calcolato dal prodotto dei tre fattori prima descritti, che si assume varino linearmente tra 0 e 1. I valori di input del modello, rappresentati in figura 2, sono i parametri climatici T_{mmax} , T_{mmin} , Ph_{max} , Ph_{min} , VPD_{max} e VPD_{min} che rappresentano il valore minimo e massimo al di sotto o al di sopra del quale lo sviluppo della *canopy* è totalmente o per nulla limitato. Per il caso in analisi, oltre ai valori dei parametri definiti in Jolly et al. (2005), sono stati utilizzati ulteriori valori derivati da Migliavacca et al. (2008), in cui il modello GSI è stato ottimizzato sulle date fenologiche osservate in campo e che ha portato a definire soglie distinte delle tre variabili meteorologiche.

Oltre a valutare quale sia il modello che meglio si adatta alla condizione analizzata, permettendo di definire date di partenza e fine della stagione con maggiore accuratezza (confronto con osservazioni di campo), si è valutata la correlazione degli indici GI e GEI con l'andamento del GSI, in entrambe le varianti del modello.

Parametri	GSI (Jolly et al., 2005)	GSI (Migliavacca et al. 2008)	
T_{mmin} (°C)	-2.0	-2.9	
T_{mmax} (°C)	5.0	2.0	
Ph_{min} (h)	10.0	4.6	
Ph_{max} (h)	11.0	9.1	
VPD_{min} (Pa)	900	4100	
VPD_{max} (Pa)	900	4100	
Soglia	0.5	0.8	

Figura 2 – Parametri climatici e rispettivi valori nelle due varianti impiegate del modello GSI.

Risultati e discussione

Filtraggio delle immagini e generazione della serie temporale

La necessità di individuare il posizionamento dei pixel saturi ha portato alla realizzazione di una mappa di saturazione (Fig. 1a). Questa rappresenta l'intensità, intesa come numero di volte in cui un pixel risulta essere saturo (valore DN pari a 255) all'interno della serie temporale considerata. La mappa realizzata mette in evidenza come determinate zone all'interno dell'immagine presentino spesso saturazione (colore giallo in figura 3).

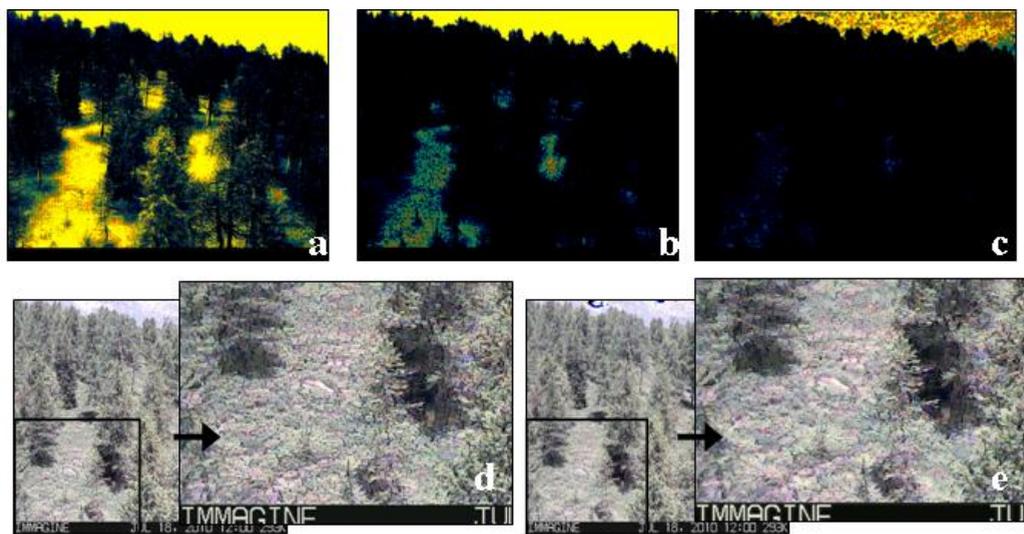


Figura 3 – A) Mappa di saturazione ottenuta dall'analisi della serie originale. Scala cromatica variabile tra 0 (in nero) e >70 (giallo), rappresenta il numero di volte che un pixel si trova in condizioni di saturazione; B) Mappa di saturazione della serie filtrata, kernel =3x3; C) Mappa di saturazione della serie filtrata, kernel =6x6 pixel; D) Immagine non filtrata; E) immagine filtrata (LEE filter) con kernel = 6x6 pixel.

Nonostante le aree maggiormente interessate da saturazione corrispondano al sottobosco e al cielo, la mappa di saturazione mette in evidenza come anche parte delle chiome siano, con minore intensità presentino pixel saturi. In figura 3 sono riportate le mappe di saturazione ottenute a seguito del filtraggio con filtri adattivi, sia per la rimozione dei pixel saturi, sia per la riduzione del rumore dell'immagine. È possibile notare come l'applicazione dei filtri adattivi abbia portato a una significativa riduzione della saturazione dell'immagine e a una riduzione del rumore dell'immagine. La riduzione del numero di pixel saturi, e della loro frequenza, a seguito del filtraggio conferma la bontà del sistema e porta a preferire un filtraggio effettuato con finestre di dimensioni maggiori (6x6 pixel, fig. 3c). La presenza di pixel saturi nelle immagini filtrate è dovuta alla vicinanza di numerosi pixel nella serie originale delle immagini. Un filtraggio basato sull'impiego di kernel di dimensioni inferiori all'area coinvolta da saturazione, permette di ridurre il numero di pixel saturi ma non di eliminarli completamente. In questo caso un kernel di dimensioni pari a 6x6 pixel è stato ritenuto ottimale poiché permette di ottenere un filtraggio valido senza andare a compromettere le caratteristiche spaziali dell'immagine.

Per la selezione delle immagini acquisite in condizioni di *clear sky* si è utilizzato il valore minimo sul canale del blu, analizzandone l'andamento all'interno di una ROI sufficientemente ampia. Gli andamenti del valore minimo del canale blu sono riportati in figura 4.

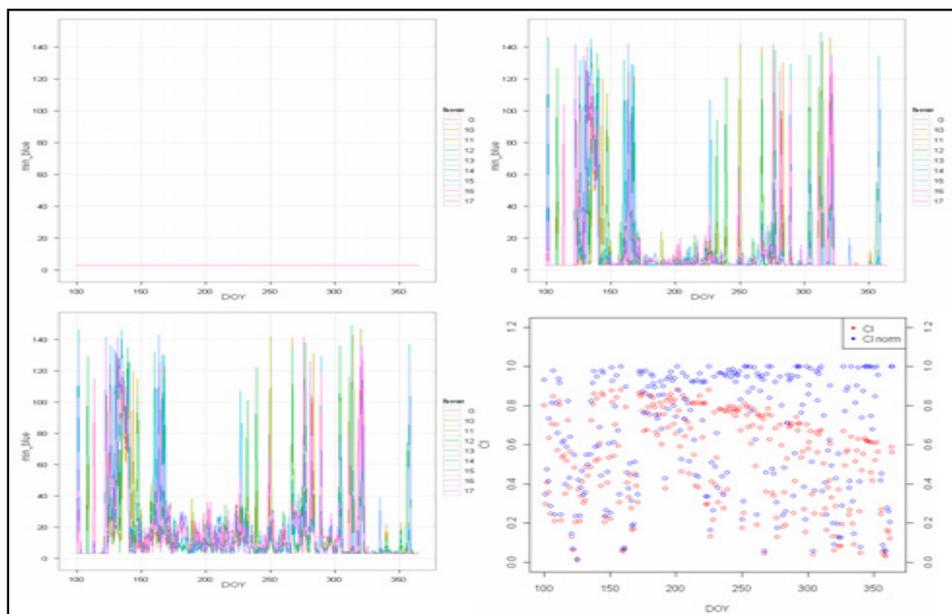


Figura 4 – A) Andamento del minimo del canale blu, serie originale. B) Andamento del minimo del canale blu, serie filtrata kernel 3x3 pixel. C) Andamento del minimo del canale blu, serie filtrata kernel 6x6 pixel, i diversi colori corrispondono alle diverse ore del giorno. D) Andamento del CI. In rosso CI, in blu CI normalizzato in base alla radiazione globale incidente.

Questi sono relativi alle tre diverse serie temporali considerate: serie originale; serie filtrata mediante filtri di LEE (kernel = 3x3); serie filtrata mediante filtri di LEE (kernel = 6x6). Definendo una ROI di dimensioni piuttosto ampie è possibile evidenziare le differenze negli andamenti relativi al valore minimo del canale blu nelle tre serie di immagini impiegate. Infatti nella serie originale il valore analizzato risulta sempre pari a 3 (valori di DN <3 non sono stati considerati, poiché ritenuti non significativi). I valori relativi alle due serie filtrate sono invece distinti e assumono valori variabili a seconda delle acquisizioni effettuate (fig. 4b-c). Questo è un'ulteriore conferma della bontà del filtraggio: la presenza di DN identici del minimo di blu al variare delle acquisizioni riconducono alla presenza di un rumore dell'immagine caratterizzato da pixel "corrotti" aventi sempre il medesimo valore. Con il filtraggio questi pixel assumono valori diversi, (media dei pixel dell'intorno), ciò spiega il perché di valori di minimo nel blu maggiori nella serie filtrata con kernel = 6x6 rispetto a quella con kernel = 3x3. Dalle serie dei minimi di blu è possibile quindi discriminare con un'apposita soglia i giorni di *clear sky*. Tramite un'analisi visiva delle immagini è risultato che i giorni di brutto tempo presentano un valore minimo nel canale del blu (immagini filtrate 6x6) superiore a circa 40 DN.

Il sistema di filtraggio sul canale del blu è stato confrontato con il valore di *Cloudiness index*, CI (Fig. 4d). Data la rapida variabilità meteorologica in ambiente alpino un valore giornaliero di CI, può non essere rappresentativo della situazione istantanea presente al sito durante l'acquisizione di un'immagine, e ciò è testimoniato dalla bassa correlazione tra valore minimo del canale del blu e CI ($r = -0.19$). Tra i giorni evidenziati come *cloudy* dal CI e quelli evidenziati come *cloudy* dal minimo del blu, da riscontro visivo si è riscontrato che il minimo del blu è più attendibile del CI, il quale si rivela poco affidabile per questo tipo di analisi.

In figura 5 è riportato un confronto grafico della stessa serie temporale dell'indice GI (valore medio a *midday*) nel tempo. I due grafici differiscono in quanto relativi a due distinte tipologie di

filtraggio: MAD, e soglia sul valore minimo del canale blu. Nell'immagine i punti in nero sono quelli scartati dal sistema di filtraggio considerato.

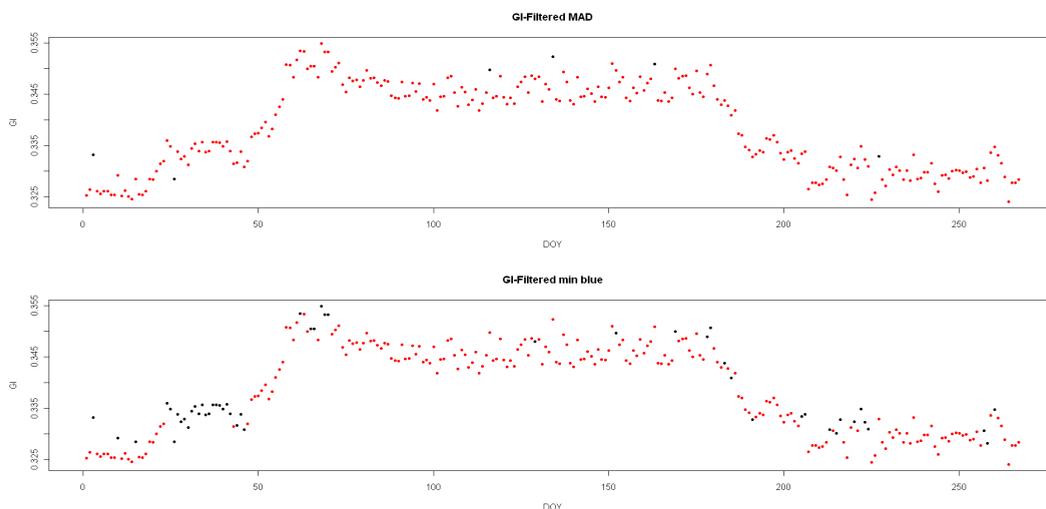


Figura 5 – Confronto serie indici GI. A) filtraggio con filtro MAD; B) filtraggio con soglia sul valore minimo del canale blu. In nero i dati scartati dal filtraggio considerato.

Come si può notare dal confronto grafico (Fig. 5), il filtraggio MAD non esclude i valori di GI che vengono estratti da immagini acquisite in condizioni di brutto tempo. Di conseguenza, essendo la serie temporale del 2010, influenzata da un lungo periodo ininterrotto di cattivo tempo nei primi 20 giorni di maggio, l'indice GI ottenuto senza tenere in conto debitamente delle condizioni meteo introduce un errore che porta a modificarne l'andamento durante la stagione.

Pertanto sembra che i risultati ottenuti dalla soglia sul valore minimo del blu sono più conservativi e conseguentemente più efficaci nello scartare dati di cattiva qualità. Questi risultati hanno portato a scegliere il metodo di filtraggio sulle soglie del blu. Nel calcolare l'indice GI, in entrambi i procedimenti, sia l'analisi relativa alla ROI (fig.1 b), sia quella relativa alla *pixel aggregation*, sono state scartate le porzioni di immagine considerate in ombra, per limitare ulteriormente gli effetti connessi alla variabilità giornaliera.

I dati mancanti nella fase di sviluppo sono stati ricostruiti mediante confronto con fIPAR misurata al sito. In figura 5 è riportato confronto tra fIPAR e GI all'interno di un intervallo che va dal DOY 108 al DOY 174. Il buon risultato della correlazione così ottenuta ($r^2 = 0.94$) conferma la possibilità di impiegare il dato di fIPAR per il *gap-filling* della serie stagionale di GI.

Analisi degli indici di colore e degli indici fenologici

In figura 6a sono riportati gli andamenti dell'indice GI, riferiti a diverse ROI distribuite casualmente all'interno dell'immagine. È possibile notare come gli andamenti dell'indice varino significativamente all'interno dell'area considerata, pur rappresentando la stessa specie vegetale (*Larix decidua*).

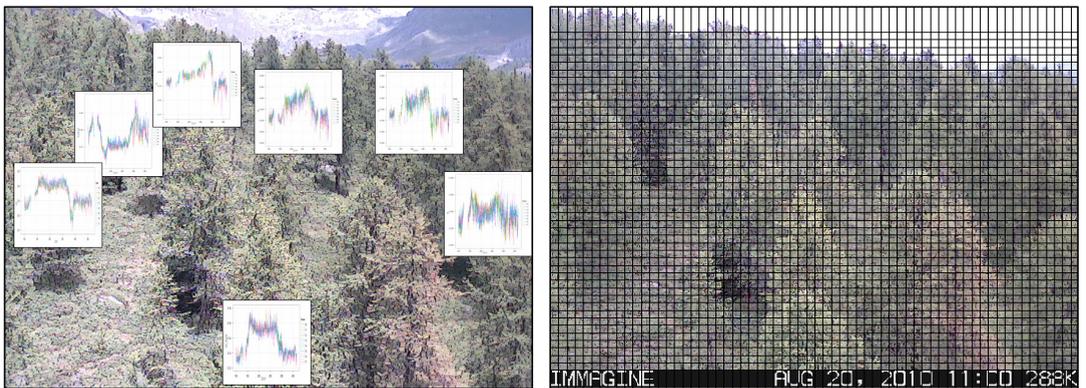


Figura 6 – a) andamento dell'indice GI relativo a 6 ROI casuali interne all'immagine. b) suddivisione dell'immagine in aggregazione di pixel (pixel aggregation, 10x10).

Le variazioni tra le diverse ROI, in cui si nota un degrado dell'informazione all'aumentare della distanza dalla camera, non sono dovute al diverso comportamento degli individui analizzati, ma dipendono da artefatti legati all'acquisizione delle immagini (bilanciamento automatico del bianco, compressione da dato raw all'estensione visualizzata .JPEG). Questo ha implicato la selezione di una ROI (fig. 1b) che permettesse di ovviare al problema della distanza, e che allo stesso tempo considerasse più individui, restituendo un'informazione su un processo legato a un campione eterogeneo dell'ecosistema considerato. Dalla serie annuale degli indici GI e GEI, calcolati all'interno di tale ROI, e dalla successiva applicazione di una *spline* cubica è stato possibile confrontare gli andamenti ottenuti con le osservazioni di campo effettuate. Si valutato quale metrica (percentile nella crescita e nella decrescita della curva) presentasse il minore scarto con le date di partenza e senescenza osservate in campo. I risultati ottenuti, figura 7, mostrano che il 50° percentile è il termine che più si avvicina alle date osservate.

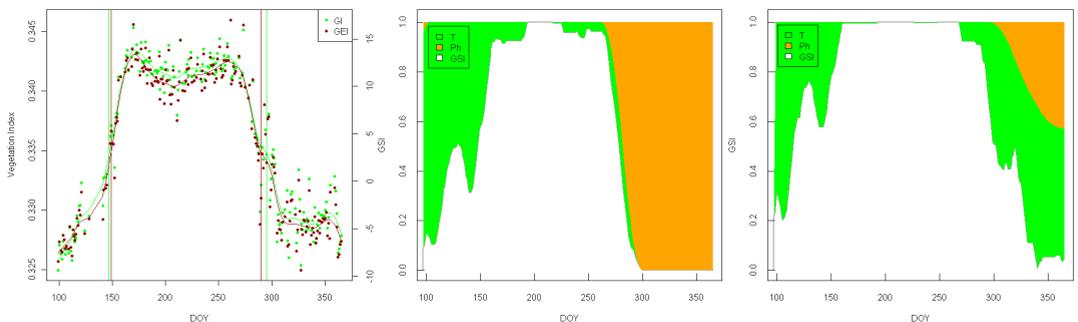


Figura 7 – a) Andamento degli indici considerati, GI (in verde), GEI (in marrone). Le linee che interpolano i punti rappresentano le spline cubiche relative e le linee verticali sono riferite alle date ottenute dal 50° percentile. b) GSI ottenuto con parametri di input di Jolly et al. (2005), in verde la limitazione dovuta alla temperatura, in arancione quella dovuta al fotoperiodo. c) GSI ottenuto con parametri di input di Migliavacca et. al (2008).

Dal confronto tra gli indici GI e GEI e l'indice GSI ottenuto impiegando le due varianti del modello (Jolly et al. 2005, Migliavacca et al., 2008) è emersa una buona correlazione con entrambi ($r^2=0.8$). Questo a conferma della possibilità d'impiego di un indice di cromaticità dell'immagine webcam per il monitoraggio delle fasi fenologiche della vegetazione.

La differente forma dell'andamento delle due varianti di GSI è attribuibile ai diversi parametri di input considerati nei due modelli. Seppur il fattore limitante in entrambe le varianti del modello risulta essere la temperatura minima dell'aria, le limitazioni imposte dal modello GSI, nella variante di Jolly et al., sono più restrittive rispetto a quelle definite per la seconda variante, il che implica una sottostima della stagione fenologica dell'ecosistema. Infatti valutando le date di inizio e fine della stagione vegetativa stimate dai due modelli, limitatamente all'anno e all'ecosistema considerato, risultano maggiormente affette da errore quelle ottenute dalla variante di Jolly et al (Fig. 8).

	Data inizio	Errore stima (gg)	Data fine	Errore stima (gg)
Osservazioni di campo	147	---	290	---
GI	147	0	295	5
GEI	149	2	290	0
GSI (Jolly et al.)	148	1	279	11
GSI (Migliavacca et al.)	152	5	293	3

Figura 8 – Tabella riassuntiva dei valori stimati con diversi indici delle date di inizio e fine della stagione fenologica.

Attraverso l'analisi degli indici di vegetazione realizzata in *pixel aggregation* è stato possibile ottenere una mappa di senescenza. La serie di giorni di brutto tempo durante la fase di sviluppo non ha permesso di ottenere l'equivalente mappa di partenza. La griglia mostrata a partire dalla quale è stata effettuata la *pixel aggregation* (figura 5b) non considera la maggior parte del cielo mentre include oltre che ai larici il sottobosco. Nonostante i problemi riguardanti le limitazioni strumentali che non permettono di avere un dato affidabile nelle aree dell'immagine poste a maggiore distanza dalla webcam, la mappa di senescenza è un risultato incoraggiante poiché permette di discriminare aree e popolamenti distinti tra loro. È infatti evidenziato un pattern dominante, in marrone in figura, relativo ai larici, le cui date di senescenza sono approssimativamente stimate tra DOY 250 e DOY 300, il che corrisponde alle date osservate in campo; in rosso sono invece evidenziate le aree in cui non viene raggiunta la data di senescenza e queste corrispondono alle aree di sottobosco, e al cielo all'orizzonte; infine viene evidenziata in verde una pianta da un andamento anomalo, la cui data di senescenza viene stimata nell'intervallo compreso tra il DOY 150 e il DOY 200. Questo individuo, da segnalazioni di campo e dalle stesse osservazioni delle immagine webcam, è stato evidenziato presentare uno sviluppo anomalo caratterizzato da una rapida crescita seguita nell'immediato da un precoce ingiallimento delle foglie. Questi risultati indicano la validità di un sistema di analisi spaziale che, pur partendo da un dato di qualità modesta, permette di estendere un'informazione puntuale ad un'intera area, distinguendo le differenze esistenti tra diversi alberi.

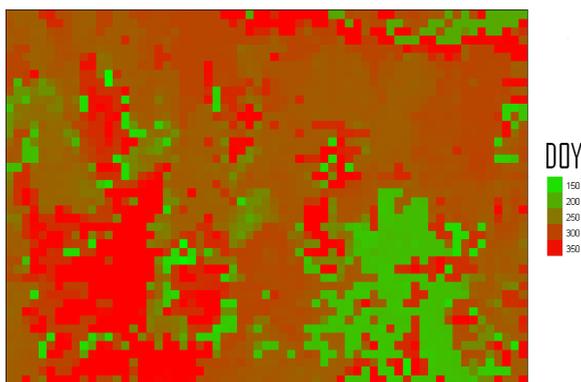


Figura 8 – Mappa di senescenza. Da verde chiaro, corrispondente al DOY 150, a rosso, corrispondente al termine dell'anno.

Conclusioni

Il presente studio ha mostrato come l'analisi di immagini prese mediante una stazione webcam permette di ottenere informazioni ad alta risoluzione temporale utili al monitoraggio del ciclo fenologico della vegetazione.

Il dato di partenza è comunque influenzato sia dal sistema di acquisizione dello strumento, sia dalle condizioni atmosferiche al momento dell'acquisizione, e pertanto sono necessarie tecniche di pre-trattamento delle immagini al fine di ottenere un dato di qualità migliore. I filtri applicati nella fase di *pre-processing* hanno mostrato risultati soddisfacenti per quanto riguarda il miglioramento della qualità del dato, e hanno permesso di definire una procedura volta a selezionare i dati acquisiti in condizioni meteorologiche avverse e quindi non significativi. È stato riscontrato che la scarsa qualità del dato è maggiormente evidente nelle aree di ripresa più distanti, che sono poco rappresentative dell'area analizzata.

Il confronto tra l'andamento degli indici derivati da immagini webcam, e quelli di origine fenologica, seppur limitatamente a un unico anno di acquisizione, sembra indicare che questo strumento, relativamente economico e di sempre maggiore diffusione, consente il monitoraggio di prossimità di ecosistemi terrestri.

L'applicazione delle due varianti del modello GSI ha messo infine in evidenza come la variante di Migliavacca et al. (2008) sia quella che meglio stima la durata del ciclo fenologico, in quanto considera soglie meno restrittive dei fattori climatici limitanti.

Infine l'analisi a due livelli distinti, (a livello di ROI e a livello di *pixel aggregation*) ha portato alla caratterizzazione spaziale oltre che temporale del dato ottenuto e, seppur con determinate limitazioni, apre la strada a sviluppi futuri e a nuove applicazioni delle webcam, permettendo di evidenziare aree interne all'immagine soggette a un differente comportamento durante la stagione considerata.

Bibliografia

- Lee, Jong-Sen, (1980). Digital Image Enhancement and Noise Filtering by Use of Local Statistics. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol PAMI-2, No.2, March, pp. 165-168.
- Y. H. Yang and M. D. Levine, "The background primal sketch: an approach for tracking moving objects," in *Machine Vision and Applications*, vol. 5, 1992, pp. 17-34.
- Bird, R.E., Hulstrom, R.L., 1981. A Simplified Clear Sky Model for Direct and Diffuse Insolation on Horizontal Surfaces. Solar Energy Research Institute, Golden.
- Lieth H (1974) Phenology and seasonality modelling. Springer, Heidelberg
- Schwartz MD, Reiter BE (2000) Changes in North American spring. *Int J Climatol* 20:929-932
- Badeck FW, Bondeau A, Böttcher K, Doktor D, Lucht W, Schaber J, Sitch S (2004) Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist* 162:295-309
- Busetto, L., Colombo, R., Migliavacca, M., Cremonese, E., Meroni, M., Galvagno, M., Rossini, M., Siniscalco, C., Morra Di Cella, U., Pari, E., 2010. Remote sensing of larch phenological cycle and analysis of relationships with climate in the Alpine region. *Global Change Biology* 16 (9), 2504-2517.
- Fonti, P., von Arx, G., Garcia-Gonzalez, I., Eilmann, B., Sass-Klaassen, U., Gartner, H., Eckstein, D., 2010. Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist* 185 (1), 42-53.
- Migliavacca, M., Cremonese, E., Colombo, R., Busetto, L., Galvagno, M., Ganis, L., Meroni, M., Pari, E., Rossini, M., Siniscalco, C., di Cella, U.M., 2008. European larch phenology in the Alps: can we grasp the role of ecological factors by combining field observations and inverse modelling? *International Journal of Biometeorology* 52 (7), 587-605.
- Moser, L., Fonti, P., Buntgen, U., Esper, J., Luterbacher, J., Franzen, J., Frank, D., 2010. Timing and duration of European larch growing season along altitudinal gradients in the Swiss Alps. *Tree Physiology* 30 (2), 225-233.

- Ahrends, H.E., Brugger, R., Stockli, R., Schenk, J., Michna, P., Jeanneret, F., Wanner, H., Eugster, W., 2008. Quantitative phenological observations of a mixed beech forest in northern Switzerland with digital photography. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113, G4.
- Richardson, A.D., Braswell, B.H., Hollinger, D.Y., Jenkins, J.P., Ollinger, S.V., 2009. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Ecological Applications* 19 (6), 1417–1428.
- Richardson, A.D., Jenkins, J.P., Braswell, B.H., Hollinger, D.Y., Ollinger, S.V., Smith, M.L., 2007. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia* 152 (2), 323–334.
- Jacobs, N., Burgin, W., Fridrich, N., Abrams, A., Miskell, K., Braswell, B.H., Richardson, A.D., Pless, P., 2009. The Global Network of Outdoor Webcams: Properties and Applications. In: *ACM GIS'09*, Seattle, WA, USA.
- Bradley, E., Roberts, D., Still, C., 2010. Design of an image analysis website for phenological and meteorological monitoring. *Environmental Modelling and Software* 25 (1), 107–116.
- Sonnentag, O., Detto, M., Vargas, R., Ryu, Y., Runkle, B.R.K., Kelly, M., Baldocchi, D.D., 2011. Tracking the structural and functional development of a perennial pepperweed (*Lepidium latifolium* L.) infestation using a multi-year archive of webcam imagery and eddy covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 151, 916–926.