

## Applicazione di modelli per il monitoraggio del ciclo fenologico in popolamenti di larice mediante immagini satellitari MODIS

Lorenzo Busetto (\*,\*\*), Edoardo Cremonese (\*\*), Mirco Migliavacca (\*\*\*), Roberto Colombo (\*\*\*)  
Umberto Morra di Cella (\*\*), Consolata Siniscalco (\*\*\*\*)

(\*) CNR-IIA, Via Salaria Km 29,300 C.P. 10 - 00016 Monterotondo Stazione RM Roma, lorenzo.busetto@unimib.it

(\*\*) ARPA Valle d'Aosta ARPA Valle d'Aosta - Loc Grande Charrière 44 - 11020 Saint Christophe -  
Aosta - Italy, e.cremonese@arpa.vda.it

(\*\*\*) Laboratorio di Telerilevamento delle Dinamiche Ambientali – Università di Milano-Bicocca, P.za della Scienza 1  
, Milano, mirco.migliavacca@unimib.it

(\*\*\*\*) Dipartimento di Biologia Vegetale – Università di Torino

### Riassunto

In questo contributo vengono descritti i risultati preliminari del progetto REPHLEX, finalizzato allo sviluppo di una procedura standardizzata per il monitoraggio del ciclo fenologico dei popolamenti di larice a partire da rilievi di campo e dall'analisi di immagini satellitari multitemporali. Le date di inizio e fine della stagione vegetativa di 8 popolamenti di larice localizzati nel territorio della Valle d'Aosta per gli anni 2005 e 2006 sono state stimate a partire dalle serie temporali di immagini MODIS NDVI a 16 giorni di risoluzione temporale, applicando un apposito algoritmo di *curve fitting*. L'applicazione dell'algoritmo ha permesso di stimare le date di inizio e fine stagione dei siti selezionati con errori RMSE di circa 5 giorni, a conferma dell'utilità delle immagini MODIS ai fini del monitoraggio del ciclo fenologico in ecosistemi forestali.

### Abstract

In this paper, we describe the preliminary results of the REPHLEX project, which is aimed at the development of a standardized method for monitoring the phenological cycle of European Larch through field campaigns and remotely sensed data. The starting and ending dates of the growing season of 8 larch stands located in the Aosta Valley for the 2005 and 2006 years were estimated from 16-days multitemporal MODIS NDVI images, by applying a *curve fitting* algorithm. This allowed to estimate the phenological dates with an error of about 5 days for both the start and the end of the season, confirming the usefulness of MODIS images for phenological cycle monitoring in forest ecosystems.

### Introduzione

Il monitoraggio delle variazioni del ciclo fenologico della vegetazione costituisce un importante strumento per stimare l'entità degli effetti prodotti dai cambiamenti climatici sugli ecosistemi forestali, in quanto le modifiche nel ciclo fenologico costituiscono un indicatore sensibile e osservabile per la comprensione delle complesse dinamiche che legano il clima e la biosfera. In questo contesto, le tecniche di telerilevamento satellitare costituiscono un valido strumento di analisi, in quanto permettono di stimare con buona accuratezza le date di inizio ( $t_{ON}$ ) e fine ( $t_{OFF}$ ) della stagione vegetativa in modo automatico e su aree molto estese (e.g., Schwartz et al., 1999). Attraverso l'analisi di serie pluriennali di immagini telerilevate risulta possibile analizzare le variazioni interannuali nel ciclo fenologico degli ecosistemi, e le loro relazioni con le variazioni di importanti parametri meteo-climatici quali la temperatura o le precipitazioni. Le metodologie utilizzate ai fini della stima delle date di inizio e fine stagione a partire da immagini telerilevate si basano generalmente sull'analisi di serie multi temporali di indici di vegetazione quali l'NDVI o l'EVI ricavate da immagini satellitari a bassa risoluzione spaziale. In particolare, numerosi studi sono stati condotti a questo scopo utilizzando dati NOAA-AVHRR (e.g., Shabanov et al., 2002; Tucker et al., 2001). La messa in opera del sensore MODIS ha dato nuovo slancio a questo ambito

di ricerca, come testimoniano i numerosi studi recentemente pubblicati (e.g., Kang et al., 2003; Zhang et al., 2003).

In questo lavoro vengono descritti i metodi utilizzati e i risultati ottenuti nell'ambito del progetto REPHLEX (Remote Sensing of Phenology Larix Experiment), condotto dal Laboratorio di Telerilevamento delle Dinamiche Ambientali dell'Università di Milano-Bicocca e da ARPA Valle d'Aosta. Il progetto REPHLEX è finalizzato allo sviluppo di una procedura standardizzata per il monitoraggio del ciclo fenologico dei popolamenti di larice (*Larix Decidua*) a partire da rilievi al suolo e dall'analisi di serie multitemporali di immagini MODIS NDVI.

### Area di studio

L'attività di ricerca è stata condotta in 8 popolamenti di larice appositamente selezionati nel territorio della Valle d'Aosta. I siti selezionati sono caratterizzati dalla presenza di popolamenti di larice pressoché puri, dotati di un'estensione territoriale sufficiente a renderne possibile l'analisi a partire da immagini MODIS. I diversi siti sono inoltre posizionati a quote differenti (variabili da 1350 a 2100 m ), in modo da includere sia i popolamenti compresi all'interno dell'areale di distribuzione naturale (1500-2100) sia i rimboschimenti delle quote inferiori e sono esposti prevalentemente a sud, in modo da evitare problemi di ombreggiamento durante la prima parte della stagione vegetativa (Figura 1).

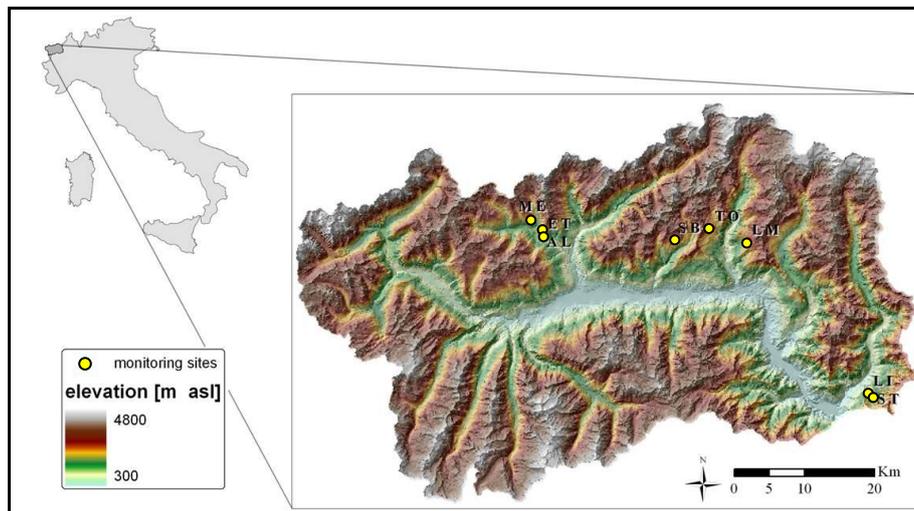


Figura 1 – Localizzazione dei siti di monitoraggio

### Misure a terra

Durante le stagioni vegetative 2005 e 2006 all'interno degli otto siti selezionati sono state periodicamente eseguite delle campagne di misura a terra allo scopo di monitorare il ciclo fenologico dei popolamenti di larice indagati. A tale scopo, in ciascun sito sono state individuate tre aree di saggio di circa dieci metri di diametro localizzate a diverse quote, all'interno delle quali sono state casualmente selezionate dieci piante di larice, per un totale di 30 piante per sito.

Durante la fase di sviluppo degli aghi, ad ogni data di campionamento è stata quindi determinata la classe fenologica di appartenenza di ciascuna pianta selezionata. In base alla classe rilevata, ad ogni pianta è stato quindi assegnato un punteggio, secondo lo schema riportato nella colonna sinistra di Tabella 2. Per quanto riguarda invece il periodo di senescenza della vegetazione, il rilievo della fase fenologica si è basato sull'analisi visiva del processo di decolorazione degli aghi. Ogni pianta selezionata è stata quindi assegnata ad una classe di colore, corrispondente a un "punteggio di decolorazione", secondo lo schema riportato nella colonna destra di Tabella 2.

Le fasi fenologiche relative a ciascuno degli otto siti sono state successivamente determinate calcolando il valore medio dei punteggi assegnati alle 30 piante corrispondenti, per ogni data di campionamento.

Periodo di Crescita		Periodo di Senescenza	
Fase fenologica	Punteggio	Fase Fenologica	Punteggio
Gemme dormienti	1	Ingiallimento localizzato	1
Gemme aperte, Aghi < 1 cm	2	Ingiallimento diffuso	2
Lunghezza aghi tra 1 e 3 cm	3	Totale ingiallimento	3
Lunghezza aghi > 3 cm	4	Arrossamento diffuso	4
Aghi completamente sviluppati	5	Totale arrossamento	5

Tabella 2 - Descrizione delle fasi fenologiche monitorate e dei corrispondenti punteggi

In base ai rilievi effettuati, sono state infine stimate le date di completamento di ciascuna fase fenologica nei diversi siti. Tali valori sono stati ricavati interpolando linearmente i valori ottenuti nelle diverse date di campionamento, e determinando la data in cui il profilo interpolato supera il valore relativo a ciascuna fase (es. valore 2 per il completamento della fase di apertura degli aghi nella stagione di crescita; Valore 3 per il completo ingiallimento della chioma nella stagione di senescenza). Si è assunto poi che la data di inizio della stagione vegetativa corrispondesse alla data di completamento della fase di apertura degli aghi, e che la data di fine della stagione corrispondesse alla data di completamento della fase di ingiallimento localizzato.

### Acquisizione e pre-elaborazione delle immagini MODIS

I dati satellitari utilizzati nello studio sono state le immagini relative all'indice di vegetazione NDVI ricavate a partire dal prodotto "MODIS Vegetation Indexes -16 Days - 250m v004", per il periodo 2000-2006. Le immagini sono state scaricate attraverso l'archivio distribuito "Earth Observing System Data Gateway" utilizzato dalla NASA per la distribuzione dei dati acquisiti dai sensori della serie MODIS (<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>). Le immagini sono state innanzitutto ritagliate sull'area della Valle d'Aosta e riproiettate nel sistema di riferimento UTM-WGS84. Le serie multi temporali MODIS NDVI sono state successivamente sottoposte ad una procedura di *smoothing* utilizzando la tecnica proposta da Chen et al. (2004) basata sull'applicazione iterativa di una funzione di filtraggio di Savitzky and Golay. L'applicazione della procedura di *smoothing* ha permesso di rimuovere dalle serie NDVI la maggior parte dei valori erronei corrispondenti a dati acquisiti con bassa qualità a causa della persistente nuvolosità tipica del periodo invernale.

### Stima delle date di inizio e fine della stagione vegetativa

L'elevata quota della maggior parte dei popolamenti di larice della Valle d'Aosta rende difficoltosa la stima delle date di inizio e fine della stagione vegetativa a partire da immagini telerilevate, in quanto le variazioni temporali di NDVI nel periodo invernale e primaverile risultano fortemente influenzate dall'eventuale copertura nevosa. Risulta quindi difficile distinguere le variazioni di NDVI legate ai cicli di sviluppo\senescenza della copertura vegetale da quelle legate ai cicli di deposizione\scioglimento della neve.

Per ovviare a questo problema, in questo lavoro le date di inizio e fine stagione sono state stimate applicando un algoritmo proposto da Beck et al. (2006) ai fini del monitoraggio del ciclo fenologico in foreste di *Betula Pubescens* alle alte latitudini. Tale algoritmo si basa sulla sostituzione dei valori di NDVI relativi alle date caratterizzate dalla presenza di copertura nevosa con un valore di NDVI ritenuto rappresentativo delle caratteristiche spettrali del pixel considerato in assenza di vegetazione. Il funzionamento dell'algoritmo può essere così schematizzato:

- i) Per ogni pixel dell'immagine, il valore tipico di NDVI in assenza di vegetazione ( $NDVI_{win}$ ) viene determinato calcolando la media dei valori minimi di NDVI registrati nel periodo autunnale in assenza di copertura nevosa, per i sette anni considerati. A tale scopo, le date di acquisizione caratterizzate da assenza di copertura nevosa vengono individuate in base all'analisi dello "Snow Index" riportato nei *Quality Assurance Data Sets* associati a ciascuna immagine del prodotto MOD13Q1, e riportanti informazioni relative alla qualità di acquisizione del dato per ogni *pixel* dell'immagine (Huete et al., 1999).
- ii) I valori di NDVI inferiori alla soglia individuata vengono sostituiti con il valore  $NDVI_{win}$ , ottenendo così una nuova serie temporale di NDVI nella quale si suppone che l'influenza della neve sul segnale misurato sia stata rimossa (Figura 3).

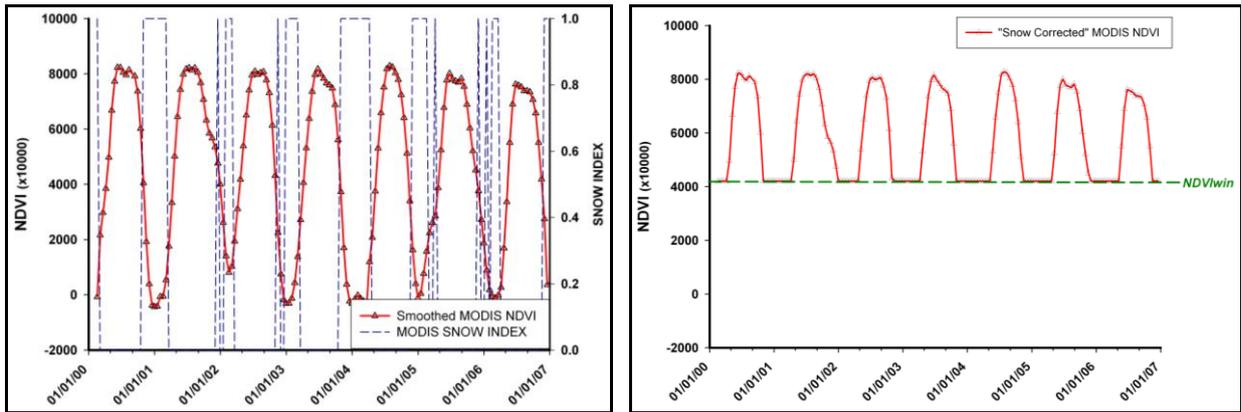


Figura 3 – Esempio di sostituzione dei valori di NDVI misurati in presenza di copertura nevosa con il valore di soglia  $NDVI_{win}$

- iii) Le date di inizio e fine stagione relative al pixel considerato vengono determinate in base ai risultati di un *fitting* ai minimi quadrati di una funzione di tipo *double logistic* alle serie temporali di NDVI relative a ciascun anno ottenute al punto ii). La funzione di *fitting* utilizzata è riportata in Equazione 1:

$$NDVI(t) = NDVI_{win} + (NDVI_{MAX} - NDVI_{win}) \cdot \left( \frac{1}{1 + e^{a(t-t_{ON})}} + \frac{1}{1 + e^{b(t-t_{OFF})}} - 1 \right) \quad [1]$$

, dove  $NDVI(t)$  è il valore di NDVI relativo alla data di acquisizione  $t$ ,  $NDVI_{win}$  è il valore di tipico di NDVI in assenza di vegetazione calcolato al punto ii), mentre  $NDVI_{MAX}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $t_{ON}$  e  $t_{OFF}$  sono i cinque parametri incogniti che descrivono la forma della funzione che meglio interpola i valori di NDVI. In particolare,  $t_{ON}$  e  $t_{OFF}$  corrispondono alle date in cui la funzione di interpolazione presenta la massima pendenza, rispettivamente nella fase primaverile e nella fase autunnale, e si assume che corrispondano rispettivamente alle date di inizio e fine della stagione vegetativa per l'anno considerato.

In Figura 4 è mostrato, a titolo di esempio, il risultato dell'applicazione della procedura stima delle date di inizio e fine della stagione vegetativa ad uno dei pixels appartenenti al sito di Torgnon, localizzato a quota 2080 m s.l.m..

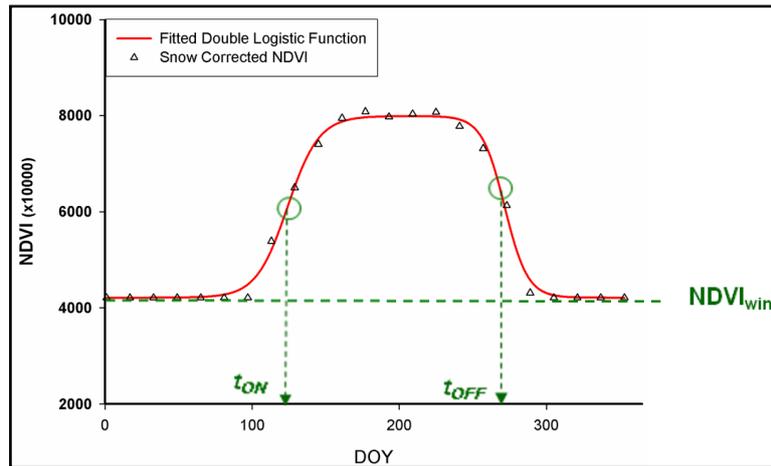


Figura 4 – Determinazione delle date di inizio e fine della stagione vegetativa per uno dei pixels relativi al sito di monitoraggio di Torgnon (Anno 2005)

### Analisi dei risultati

L'accuratezza dell'algorithm applicato è stata valutata mediante il confronto tra le date di inizio e fine della stagione stimate e quelle osservate in campo negli anni 2005 e 2006 (Figura 5). L'accuratezza delle date stimate, valutata in base al valore dell'errore RMSE, è risultata pari a circa 5 giorni sia per l'inizio che per la fine della stagione vegetativa.

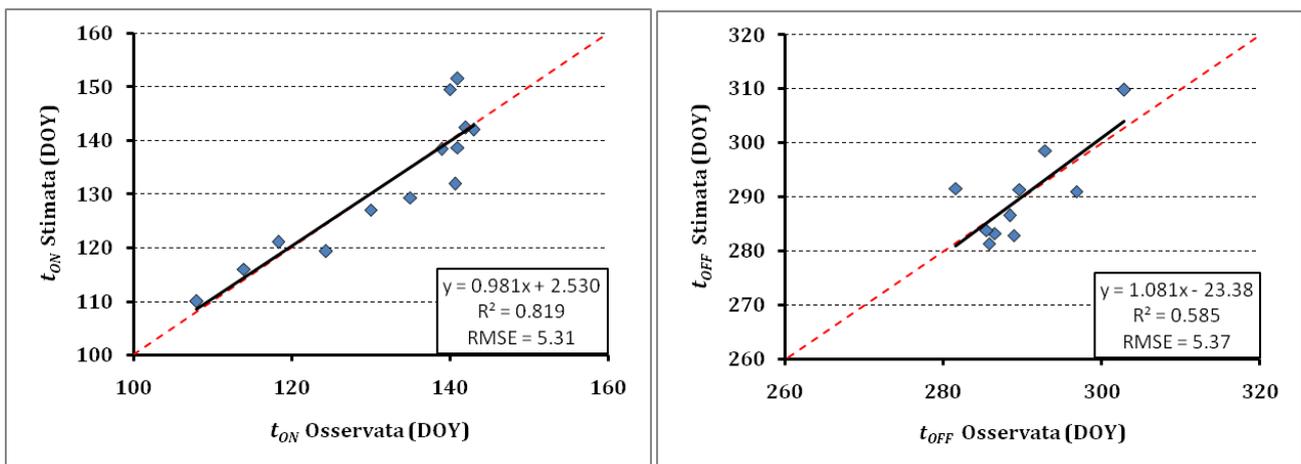


Figura 5 – Confronto tra le date di inizio e fine della stagione vegetativa osservate e stimate per gli anni 2005 e 2006 nei siti considerati.

### Conclusioni e sviluppi futuri

I risultati preliminari descritti confermano l'utilità delle serie temporali MODIS NDVI ai fini del monitoraggio del ciclo fenologico dei popolamenti di larice, nonostante la frequente copertura nevosa renda necessario l'utilizzo di adeguate tecniche di pre-elaborazione del dato. L'errore di stima ottenuto può essere considerato accettabile, ed è in linea con quanto riportato in studi precedenti (e.g., Zhang et al., 2006). L'esiguo numero di punti di validazione disponibili rende tuttavia consigliabile una più approfondita analisi dell'effettiva accuratezza delle date stimate. A tale scopo, la procedura descritta verrà innanzitutto applicata anche alla stagione vegetativa 2007, per la quale sono attualmente in fase di esecuzione i rilievi finalizzati alla raccolta dei dati relativi alle date di inizio e fine della stagione vegetativa nei siti indagati.

### Riferimenti bibliografici

- Beck P.S.A, Atzberger C., Høgda K.A., Johansen B., Skidmore A.K., (2006), “Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI”, *Remote Sensing of Environment*, 100, 281-426.
- Chen J., Jönsson P., Tamura M., Gu Z., Matsushita B., Eklundh L. (2004), “A simple method for reconstructing a highquality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter”, *Remote Sensing of Environment*, 91, pp. 332-344.
- Huete A., Justice, C. O., Van Leeuwen, W. (1999), “MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document Version 3.”, [http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod13.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf)
- Kang S., Running S.W., Lim J., Zhao M.P.C., Loehman R. (2003), “A regional phenology model for detecting onset of greenness in temperate mixed forests, Korea: an application of MODIS leaf area index”, *Remote Sensing of Environment*, 86, 232-242.
- Schwartz M.D., Reed B.C. (1999), “Surface phenology and satellite sensor-derived onset of greenness: an initial comparison”, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.20, 17,3451-3457
- Shabanov N.V., Zhou L., Knyazikhin Y., Myneni R.B., Tucker C.J. (2002), “Analysis of interannual changes in northern vegetation activity observed in AVHRR data from 1981 to 1994”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol.40, 1, 115-130.
- Tucker C.J., Slayback D.A., Pinzon J.E., Los S.O., Myneni R.B., Taylor M.G. (2001), “Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999”, *International Journal of Biometeorology*, Volume 45, Number 4.
- Zhang X., Friedl M. A. and Schaaf C.B. (2006), “Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements, *Journal of Geophysical Results*, 111, G04017.
- Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., Reed B.C., Huete A. (2003), “Monitoring vegetation phenology using MODIS”, *Remote Sensing of Environment*, 84, 471-475.