

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito delle attività svolte dal Laboratorio di Telerilevamento delle Dinamiche Ambientali (LTDA, Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio e di Scienze della Terra - Università degli Studi di Milano-Bicocca) a supporto della missione satellitare FLEX (*FLuorescence EXplorer*), candidata dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) per le prossime missioni spaziali di Osservazione della Terra.

In questo contesto, l'obiettivo del lavoro di tesi è stato quello di analizzare la variabilità spaziale e temporale della fluorescenza della vegetazione indotta dalla radiazione solare (F_s) a partire da dati telerilevati multisorgente in una pecceta localizzata in Repubblica Ceca. F_s rappresenta un processo di dissipazione dell'energia in eccesso accumulata dai complessi antenna dei fotosistemi esposti alla radiazione solare e consiste nell'emissione di radiazione elettromagnetica da parte della clorofilla a (Chl a) a una lunghezza d'onda di poco superiore rispetto a quella di assorbimento, con due massimi nelle regioni spettrali del rosso e dell'infrarosso vicino (NIR), rispettivamente a circa 690 nm e 740 nm. Negli ultimi anni è stato dimostrato che F_s può essere quantificata con tecniche passive utilizzando strumenti di misura con una risoluzione radiometrica e spettrale molto elevata. Tali strumenti devono essere in grado di registrare il segnale all'interno di particolari intervalli spettrali molto ristretti dove l'energia incidente del Sole viene quasi totalmente assorbita dall'ossigeno atmosferico (bande telluriche di assorbimento, in particolare la banda O₂-A, posta a 760.6 nm, e la O₂-B a 687.0 nm, in prossimità dei massimi di emissione in F_s).

I dati impiegati sono stati raccolti in una campagna di misura promossa da ESA e dal centro di ricerca di Jülich, *Forschungszentrum Jülich* (Germania), nell'ambito del progetto HYFLEX, svoltasi dal 3 al 9 settembre 2012 presso il sito sperimentale di Bily Kriz, in Repubblica Ceca. L'area è caratterizzata dalla presenza di formazioni di abete rosso (*Picea abies* (L.) H. Karst., 1881) pressoché monospecifiche e sottoposte periodicamente a rinnovamento, inframezzate da prati. Sono presenti anche alcuni gruppi di latifoglie, spesso in zone marginali della pecceta o come alberi isolati in prossimità delle abitazioni.

Le misure spettrali a terra sono state acquisite il 5 e 9 settembre in corrispondenza di due *stand* di abete rosso e di prato artificiale messo in posto *ad hoc*. I due *stand* di abete rosso sono stati monitorati con un sistema di acquisizione manuale installato su una piattaforma idraulica mobile a un'altezza di 5 m dalla sommità della *canopy* e un sistema automatizzato installato su una torre ad un'altezza di circa 21 m dalla *canopy*. Il tappeto erboso è stato invece misurato con un secondo sistema automatizzato installato su un cavalletto. Ciascuno dei tre sistemi utilizzati è costituito da una coppia di spettrometri con caratteristiche spettrali diverse: il primo copre il *range* di lunghezze d'onda 400-1000 nm e permette la stima di diversi indici di vegetazione e della radiazione incidente, il secondo, dedicato alla stima della fluorescenza, copre un *range* spettrale ristretto centrato sulle bande di assorbimento dell'ossigeno atmosferico e presenta una maggiore risoluzione spettrale. A partire dai dati acquisiti sono stati calcolati gli spettri di radianza e riflettanza (r) delle superfici vegetali osservate, da cui sono state ottenute le serie temporali di due indici di vegetazione tradizionali, il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e il *Meris Terrestrial Chlorophyll Index* (MTCI), della fluorescenza della clorofilla in corrispondenza della banda O₂-A (F_s O₂-A) utilizzando tecniche di *fitting* spettrale (*Spectral Fitting Method*, SFM), della radianza incidente (L_{in}) a 747.5 nm e di F_y (*Apparent Fluorescence Yield*, rapporto tra F_s e L_{in}).

I dati telerilevati sono stati acquisiti nei giorni 5 e 9 settembre tra le ore 11:01 e le ore 15:40 (ora solare locale) per un totale di tredici immagini, mediante il sensore iperspettrale aviotrasportato HyPlant (Specim, Finlandia). I voli sono stati effettuati ad una quota di 600 m circa, cui corrisponde una risoluzione dell'immagine al suolo di circa 1x1 m. HyPlant è un sensore sperimentale appositamente sviluppato per la stima della F_s ed è caratterizzato da un'elevatissima risoluzione spettrale nella regione del rosso e del NIR (1024 bande nel *range* 670-780 nm, ampiezza delle bande ≈ 0.25 nm). A partire dalla mappa di radianza sono state calcolate le mappe degli indici NDVI e MTCI e di F_s .

Le immagini sono state georeferenziate utilizzando il software di ortorettificazione PARGE® (*Parametric Geocoding for Airborne Optical Scanner Data*, ReSe Applications Schläpfer, Svizzera). La geometria di scansione di ciascun pixel è stata ricostruita a partire dagli angoli di assetto e dalla posizione in un sistema di coordinate (x,y,z) dell'aereo durante l'acquisizione dell'immagine. Questi valori sono misurati da un'unità GPS/INS associata al sensore e salvati in un file di navigazione. Tale file è stato utilizzato unitamente ad alcuni dati tecnici del sensore, alla quota del terreno ottenuta da un *Digital Elevation Model* (DEM) e a una serie di *Ground Control Points* (GCP), come input del software per ottenere le mappe di radianza georeferenziate e ortorettificate e le mappe degli angoli di scansione associate.

Inoltre, è stata calcolata la radiazione fotosinteticamente attiva (*Photosynthetically Active Radiation*, PAR) "pixel per pixel", a partire da parametri ottenuti da un modello di trasferimento radiativo (MODTRAN®5) e da parametri topografici derivati dal DEM.

Le mappe di F_s per le immagini aeree sono state ottenute utilizzando un metodo statistico basato sulla *Singular Vector Decomposition* (SVD), e sono state validate seguendo un approccio quali-quantitativo articolato in due fasi:

- analisi della sensibilità (capacità) dell'algoritmo nel discriminare tra superfici con valori attesi di fluorescenza diversi: pecceta, latifoglie, prato naturale, prato artificiale, superfici non fluorescenti;
- confronto dei valori di fluorescenza misurati a terra con quelli ottenuti dalla mappa a parità di superficie indagata.

Al fine di indagare la variabilità spaziale della F_s nella pecceta è stata analizzata l'immagine derivata dal volo effettuato il 9 settembre alle 13:10 locali. La gestione della foresta nel tempo ha prodotto nell'area osservata un mosaico in cui ciascuna porzione della pecceta è pressoché coetanea; sono state individuate manualmente cinquanta regioni di interesse (*Region Of Interest*, ROI) di eguali dimensioni areali (800 pixel ≈ 800 m²) relative ad altrettanti *stand* forestali, considerati rappresentativi di gran parte degli appezzamenti forestali nell'area del sorvolo. A partire da dati di letteratura di studi su abete rosso e da una mappa forestale dell'area, è stato possibile ottenere una relazione funzionale fra l'altezza degli alberi e la loro età; questa relazione è stata sfruttata in un algoritmo sviluppato *ad hoc* per ottenere l'età media di ciascuno *stand* a partire da una mappa di altezza della *canopy* derivata da un sensore LIDAR (*Light Detection And Ranging*). Per ogni *stand* sono stati inoltre calcolati i valori medi di F_s , NDVI, MTCI e PAR a partire dalle rispettive mappe.

Gli indici di vegetazione derivati dall'analisi dei dati di campo mostrano un andamento simile nei due giorni di misura, sia in termini di valore assoluto sia di andamento durante la giornata. Il segnale di F_s

proveniente dalla pecceta è piuttosto debole, soprattutto nello *stand* osservato dalla torre. Questa discrepanza nei valori di F_s dei due *stand* può essere spiegata dal minore valore di indice di area fogliare (*Leaf Area Index*, LAI) misurato nello *stand* della torre ($6.4 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$ contro $8 \text{ m}^2\text{m}^{-2}$), e con la minore copertura della vegetazione in quell'area. Inoltre F_s varia maggiormente nei due giorni di misura rispetto agli indici di vegetazione, sia in valore assoluto sia come andamento temporale. Probabilmente questo si verifica in risposta alle condizioni atmosferiche non perfettamente costanti nei due giorni (evidenziate dall'andamento della L_{in}). Il ciclo diurno di F_s del prato rispecchia un andamento tipico, con un massimo di emissione a mezzogiorno in corrispondenza del picco di radiazione solare. Al contrario F_y presenta un andamento speculare, con valori decrescenti al mattino, un minimo a mezzogiorno e crescenti nel pomeriggio, ed è più stabile di F_s nel confronto fra i due giorni. I cicli diurni misurati sulla foresta mostrano un andamento meno evidente, probabilmente a causa della maggiore complessità strutturale della *canopy* che genera una risposta più articolata al variare della L_{in} e dell'elevazione solare.

La validazione delle immagini aeree ha fornito risultati soddisfacenti. Infatti, il risultato atteso è stato pienamente confermato in quanto i) le superficie indagate risultano significativamente diverse l'una dall'altra in base al segnale di F_s (test t di Student); ii) la regressione lineare ai minimi quadrati tra le misure di F_s a terra e quelle derivate dall'immagine risulta molto significativa ($p < 0.0001$) e in grado di spiegare una buona parte della varianza complessiva del dataset ($R^2 = 0.84$, figura 1). L'equazione della retta di regressione ($y = 1.1012x + 0.9852$) rivela una buona corrispondenza nei valori assoluti misurati, a meno di un offset di circa $1 \text{ mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$ nei dati derivanti dalle immagini aeree.

Per indagare le relazioni tra i valori della F_s e delle altre variabili considerate, calcolati su singole ROI, è stato scelto un approccio di tipo *stepwise*: inizialmente le variabili (scalate e centrate) sono state analizzate singolarmente in relazione con F_s , successivamente è stata effettuata una regressione *stepwise* classica. In tutti i casi esaminati (ovvero per qualunque combinazione delle variabili utilizzate) la variabile che meglio si relaziona a F_s risulta essere l'età degli *stand* ($R^2 = 0.45$, $R^2_{adj} = 0.43$, $p < 0.0001$, *Root Mean Square Error* (RMSE) = $0.18 \text{ mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$). Per quanto riguarda l'analisi multivariata, la combinazione di variabili significative selezionata dall' algoritmo *stepwise* ($R^2 = 0.63$, $R^2_{adj} = 0.61$, $p < 0.0001$, RMSE = $0.15 \text{ mWm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{nm}^{-1}$) è data da: età, PAR incidente e NDVI (figura 2). La presenza della PAR e dell'indice NDVI all'interno del modello di regressione è in accordo con il fatto che F_s è relazionata alla APAR, ovvero alla quantità di PAR assorbita dalla pianta (PAR *fAPAR). L'indice NDVI è tradizionalmente legato alla biomassa verde delle piante ed è in relazione con F_s come indicatore della quantità di materiale fotosintetico (quindi potenzialmente fluorescente). La selezione di queste variabili è quindi giustificabile anche dal punto di vista teorico, oltre che statistico. L'esistenza di una relazione tra la F_s e l'età degli *stand* rappresenta un risultato innovativo e può essere messo in relazione con il declino della capacità fotosintetica degli individui di abete rosso all'aumentare dell'altezza e dell'età, come già osservato in letteratura.

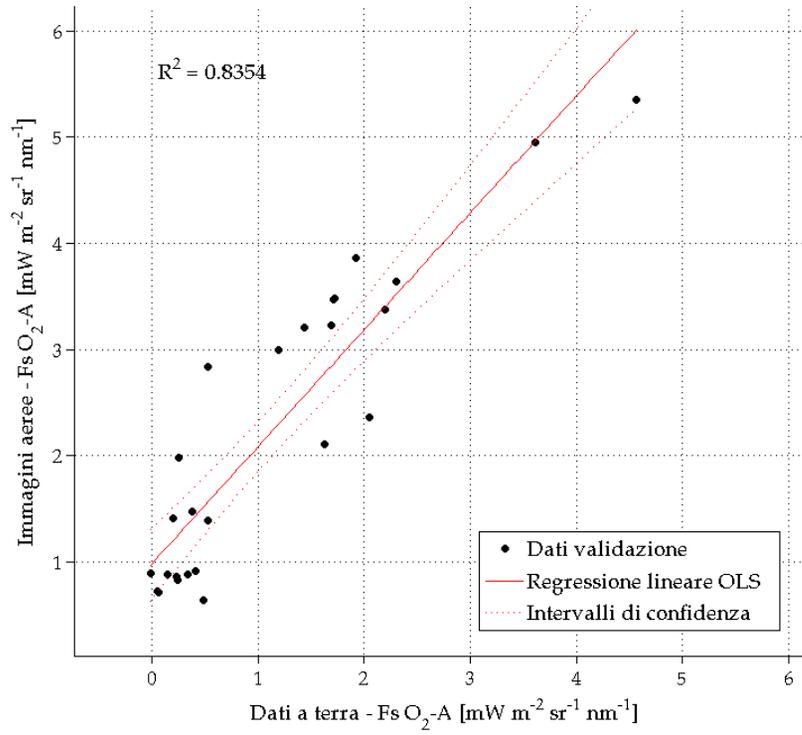


Figura 1 Modello di regressione lineare ai minimi quadrati tra i valori di F_s misurati a terra e quelli derivati dalle immagini aeree HyPlant.

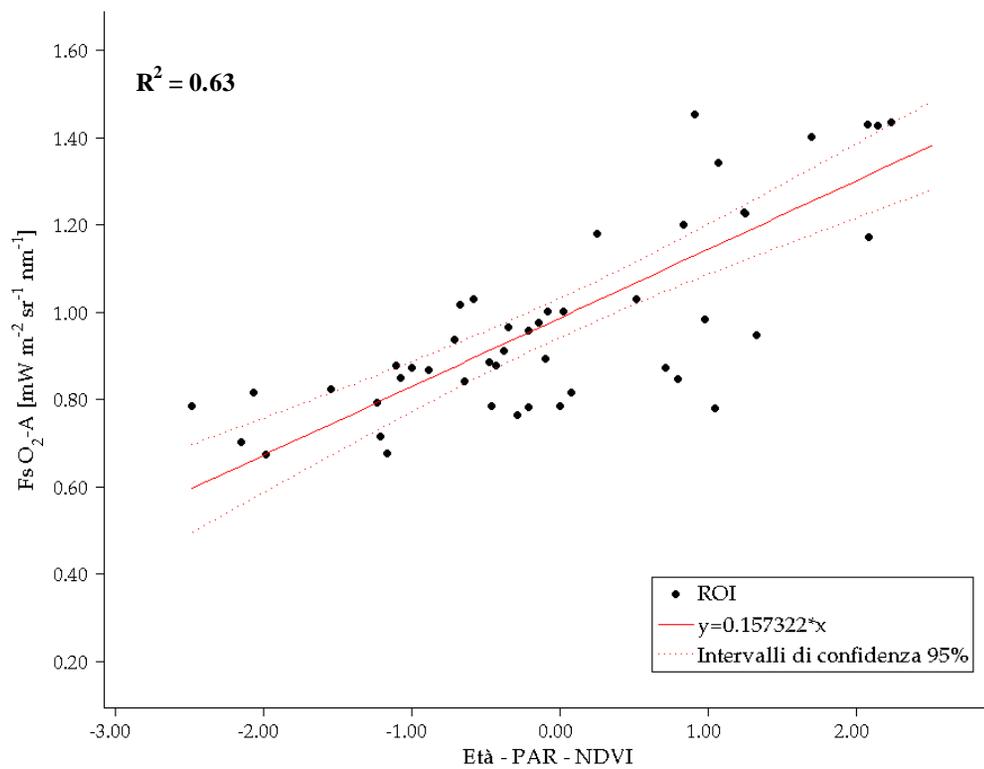


Figura 2 Modello di regressione lineare ai minimi quadrati tra F_s (y), età del popolamento, PAR e NDVI.